

Série A, N° 3252

N° d'ordre :

4124

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ES SCIENCES PHYSIQUES

PAR

René COULOMB

PREMIÈRE THÈSE :

Contribution à la géochimie de l'uranium dans les granites intrusifs

DEUXIÈME THÈSE :

Propositions données par la Faculté

Soutenues le 29 Janvier 1959 devant la Commission d'examen

MM. WYART

SOLEILLET

HOCART

ROUBAULT

Président

Examineurs

Invité

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ES SCIENCES PHYSIQUES

PAR

René COULOMB

PREMIÈRE THÈSE :

Contribution à la géochimie de l'uranium dans les granites intrusifs

DEUXIÈME THÈSE :

Propositions données par la Faculté

Soutenues le 29 Janvier 1959 devant la Commission d'examen

MM. WYART

Président

SOLEILLET

HOCART

ROUBAULT

Examineurs

Invité



PROFESSEURS

DOYEN J. PERES

G. JULIA	T Analyse sup. & Algèbre sup.	NORMANT	T Chimie organique
FOCH	T Mécan. physique et expérimentale	BENARD	T Chimie (P. C. B.)
DE BROGLIE	T Théories physique	BUVAT	T Botanique (E. N. S.)
PRENANT	T Anatomie et Histol. comparées	DUGUE	T Statistiques mathém.
PERES	T Mécan. des Fluides et applications	GELOSO	T Chimie (S. P. C. N.)
M. CURIE	T Physique (S. P. C. N.)	SOULAIRAC	T Psychophysique
BARRABE	T Géol. struct. et Géol. appliquée	ULRICH	T Physiologie Végétale
J. BOURCART	T Géogr. physique et Géol. dynamique	MARECHAL	T Optique théorique et appliquée
PLANTEFOL	T Botanique	KIRRMANN	T Théories chimiques
GRASSE	T Evolution des êtres organisés	CHADEFAUD	Botanique
PREVOST	T Chimie organique	DESTRIAU	T Physique (M. P. C.)
BOULIGAND	T Application de l'analyse à la Géométrie	Mlle LE BRETON	T Physiol. générale
CHAUDRON	T Chimie appliquée	SALEM	T Mathématiques Générales
WYART	T Minéralogie	LELONG	T Mathématiques Générales
TEISSIER	T Zoologie	DEVILLERS	Anatomie et Histologie comparées
MANGENOT	T Biol. Végétale	EHRESMANN	T Topologie algébrique
P. AUGER	T Physique quantique et relativité	FRANCON	Physique (S. P. C. N.)
MONNIER	T Physiol. générale	GLANGEAUD	T Géogr. physique et Géol. dynamique
PIVETEAU	T Paléontologie	GODEMENT	T Mathématiques (M. P. C.)
ROCARD	T Physique (E. N. S.)	PISOT	T Calcul des Probabilités
H. CARTAN	T Mathématiques (E. N. S.)	ROCH E.	T Géologie
LAFFITTE	T Chimie générale	SCHATZMANN	Astrophysique
FAVARD	T Géométrie supérieure	TERMIER	T Paléontologie stratigraphique.
COULOMB	T Physique du Globe	ZAMANSKY	T Mathématiques Générales
Mlle COUSIN	T Biol. animale (S. P. C. N.)	LENNUIER	Physique (M. G. P.)
CHRETIEN	T Chimie minérale	RIZET	Génétique
P. DRACH	T Zoologie	ROUTHIER	Géologie Appliquée
KASTLER	T Physique (E. N. S.)	Mme TONNELAT	T Phys. théor.
EPHRUSSI	T Génétique	DIXMIER	Mathématiques (M. P. C.)
WURMSER	T Biologie physico-chimique	SOUCHAY	Chimie générale
RIVIERE	T Géologie (S. P. C. N.)	AIGRAIN	T Electrotechnique
GAUTHERET	T Biol. végétale (P. C. B.)	BRUSSET	Chimie minérale
LUCAS	T Recherches physiques	M. LEVY	Physique théorique
A. THOMAS	T Biologie cellulaire	LENORMANT	T Physiologie
ARNULF	T Optique appliquée	Mme CHAIX	Chimie biologique
M. MORAND	T Enseignement de Physique	Mme HUREL-PY	Biol. Végétale (P. C. B.)
SOLEILLET	T Physique	PIAUX	Chimie (P. C. B.)
FORTIER	T Mécanique exper. des fluides	BRUN	Mécanique expérimentale des fluides
DANJON	T Astronomie	LEDERER	T Chimie des substances organiques naturelles
LAPORTE	T Physique générale et Radioactivité	Mme DUBREIL	T Mathématiques
JANET	T Mécanique analytique et Mécanique céleste	Mme LE LONG	T Mathématiques (E. N. S.)
PETIT	T Biologie maritime	BELLAIR	T Géologie (S. P. C. N.)
QUENEY	T Météorologie et dynamique atmosphérique	COTTE	T Physique (M. P. C.)
GALLIEN	T Embryologie	DUBOIS J. E.	T Chimie (S. P. C. N.)
EICHHORN	T Biologie Végétale (S. P. C. N.)	LAMOTTE	Zoologie (E. N. S.)
DE CUGNAC	T Biologie Végétale (S. P. C. N.)	LE ROLLAND	Méc. des fluides
Mlle CAUCHOIS	T Chimie Physique	MICHEL André	T Chimie (S. P. C. N.)
THELLIER	T Physique du Globe	OLMER	T Energétique Générale
L'HERITIER	T Génétique	ROUAULT	T Physique Générale
GRIVET	T Radioélectricité	GAUTHIER	T Méc. appliquée
PONCIN	T Mécanique Générale	BARCHEWITZ	Chimie Physique
DUBREIL	T Arithmétique et théorie des nombres	BROSSEL	Physique atomique
QUELET	T Chimie organique	BUSER	Biologie animale (P. C. B.)
CAGNIARD	T Géophysique appliquée	CAMUS	Biol. Vég. (P. C. B.)
CHAMPETIER	T Chimie macromoléculaire	CASTANG	Physique Générale
CUVILLIER	T Géol. structurale et Géol. appliquée	CURIEN	Minéralogie et cristallographie
JUNG	T Pétrographie	MOYSE	Physiologie Végétale
TRILLAT	T Microscopie et diffraction électronique	NOIROT	Evolution des êtres organisés
WIEMANN	T Chimie organique et structurale	PANNETIER	Chimie (S. P. C. N.)
JACQUINOT	T Spectroscopie et physique céleste	POSSOMPES	Biologie Animale (P. C. B.)
VASSY	T Physique de l'Atmosphère	PULLMANN	Chimie Théorique
DESTOUCHES	T Théories physiques	TEILLAC	Physique Nucléaire et Radioactivité
M. PRUVOST	T Géologie	TONNELAT	Biol. physico-chimique
AMIEL	T Chimie générale (P. C. B.)	VILLE	Econométrie
HOCART	T Minéralogie	WILLEMART	Chimie (P. C. B.)
J. P. MATHIEU	T Physique (P. C. B.)	DODE	T Chimie
COUTEAUX	T Biol. Animale (P. C. B.)	FREYMANN	T Physique (S. P. C. N.)
MAY	T Biol. Animale (P. C. B.)	GUINCHET	T Biol. Vég. (ORSAY)
CHOQUET	T Calcul différentiel et Intégral	ROLLET	T Chimie (P. C. B.)
FELDMANN	T Biologie (P. C. B.)	Mlle JOSIEN	T Chimie (P. C. B.)
GUINIER	T Physique des solides	CHEVALLEY	T Géométrie Algébrique et théorie des groupes
JOST	T Physiol. comparée	ARNOULT	T Physique (Orsay)
FORTET	T Calcul des probabilités	CHAPELLE	T Physique (Orsay)
SCHWARTZ	T Calcul différentiel et Intégral	DELANGE	T Mathématiques (Orsay)
CHOUARD	T Physiologie Végétale	DENY	T Mathématiques (Orsay)
MALAVARD	T Aviation	GERMAIN P.	T Mécan. théor. des fluides.
BRELOT	T Calcul différentiel	LUCAS G.	T Géologie

A ma femme.



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41554027_0013

INTRODUCTION

On suppose en général que les gisements d'uranium sont issus des roches ignées, soit directement, par des processus magmatiques, soit indirectement par d'autres processus géologiques complexes.

Un bon nombre des idées ayant encore cours reposent sur des analyses anciennes partiellement dis-créditées, faites sur des échantillons statistiquement non représentatifs.

On peut considérer que, pratiquement, seules les analyses directes récentes (une dizaine d'années) peuvent être retenues pour une étude géochimique sérieuse sur l'abondance et les lois de répartition de l'uranium. Ces dosages se sont d'ailleurs multipliés dans ces dernières années à un rythme rapide, grâce aux moyens puissants mis à la disposition des chercheurs par les grands organismes miniers.

C'est ainsi qu'au Commissariat à l'Energie Atomique, parallèlement à un effort exceptionnel dans le domaine de la géologie et de la prospection, effort mené d'ailleurs avec une grande rigueur scientifique et méthodologique, sont poursuivies des recherches fondamentales, sans aucun souci de rentabilité immédiate.

Le but du travail que nous présentons est en effet de situer sur le plan de la géochimie des granites en général, et sur le plan de la géochimie de l'uranium en particulier, un certain nombre de granites français typiques.

Les idées essentielles qui ont présidé au développement de cette étude sont les suivantes :

1) Le rôle du géochimiste est de fournir des résultats expérimentaux objectifs pouvant servir de bases rigoureuses aux autres sciences de la terre, et de replacer l'interprétation de ces résultats dans le cadre des connaissances physico-chimiques et géologiques.

2) Le choix des échantillons à étudier doit être fait selon des critères géologiques et pétrographiques, mais le prélèvement, la préparation de ces échantillons doivent s'inspirer des méthodes scientifiques, qui sont largement utilisées dans l'industrie et les mines pour le contrôle des matériaux et des fabrications.

3) L'analyse chimique n'est pas un art mais une technique qui évolue ; le résultat est toujours entaché d'une erreur dont il faut fixer les marges.

4) L'échantillon isolé n'a aucune valeur en géochimie ; il doit être l'individu d'une population statistique aussi homogène et nombreuse que possible.

5) Seul le dépouillement par les méthodes statistiques des caractères de ces populations peut permettre de déterminer des paramètres ayant à la fois un sens statistique et géochimique objectif, et ainsi de dégager des lois ou des corrélations géochimiques.

6) Les méthodes statistiques sont des outils commodes qui organisent nos connaissances mais ne créent pas miraculeusement une information qui ne serait pas incluse dans les données expérimentales initiales.

Ces conceptions ont été appliquées à l'étude de quatre massifs granitiques, à la fois typiques et variés, afin de pouvoir par des comparaisons, dégager des idées suffisamment générales sur le comportement géochimique de l'uranium.

Environ dix mille déterminations et analyses ont été effectuées sur près d'un millier d'échantillons prélevés selon des normes rigoureuses. Ce travail n'a pu être mené à bien dans un délai raisonnable que par l'utilisation d'une infra-structure analytique disposant de méthodes d'avant-garde. Cet outil analytique mis au point il y a plusieurs années, et employé industriellement par plusieurs laboratoires pour les prospections géochimiques, a pu être transposé sans difficulté aux recherches fondamentales.

Les résultats ainsi acquis ne prétendent pas élucider à eux seuls l'histoire de l'uranium dans les roches ignées ni surtout être extrapolés à des théories trop générales, mais intégrés dans l'évolution géologique de chaque roche.

Nous nous limitons à un strict point de vue pétrochimique et géochimique, laissant volontairement de côté les interprétations géologiques et pétrographiques. Ces aspects n'ont cependant pas été ignorés et sont d'ailleurs perpétuellement sous-jacents, tant dans le choix des lieux de prélèvements que dans celui des découpages que nous présentons. Mais cette étude n'est qu'un panneau d'investigations plus vastes, menées en équipe, couvrant la géologie régionale, la pétrographie, la minéralogie et la métallogénie.

Aussi, à côté de nos interprétations géochimiques, nous efforcerons-nous de présenter les résultats sous une forme suffisamment objective, souple et générale pour qu'ils puissent être utilisés par d'autres pour leurs problèmes particuliers. Le plan de travail découle de ce point de vue :

Chapitre I - Description et discussion des techniques utilisées.

Chapitre II - Application de ces techniques à un certain nombre de massifs.

Chapitre III - Interprétations géochimiques.

REMERCIEMENTS

J'exprime ma profonde reconnaissance à tous ceux qui m'ont permis de mener à bien ce travail.

Celui-ci a été réalisé sous la direction scientifique de Monsieur le Professeur Roubault, au Service de Minéralogie du Commissariat de l'Energie Atomique dirigé par Monsieur Chervet.

Monsieur le Professeur Wyart, qui a été mon maître à l'université, a encouragé et guidé cette étude.

Monsieur le Professeur Hocart m'a prodigué des conseils précieux et efficaces.

Monsieur Guéron qui s'est toujours personnellement intéressé à mes travaux a bien voulu discuter mon texte et faire des observations constructives.

Je remercie chaleureusement Monsieur Goldstein et Mademoiselle Le Mercier pour la collaboration permanente qu'ils m'ont apportée.

J'exprime ma gratitude à Mesdames Thomas, Bigureau et Dupraz pour leur aide dévouée.

Mes collègues géologues des Recherches Minières, MM. Carrat, Blangy, Garic, Marcesse, Sanselme, m'ont toujours réservé sur le terrain un accueil sympathique et efficace, m'exposant largement leurs conceptions géologiques et m'aidant matériellement dans la collecte des échantillons.

De nombreuses idées positives sont nées de discussions passionnées avec Monsieur Bigotte.

Enfin, je remercie Monsieur Guillemain pour ses encouragements amicaux.

CHAPITRE I

LES MÉTHODES

Observations générales.

Les progrès de la géochimie reposent en grande partie sur l'exploitation de résultats d'analyses de plus en plus nombreux. Il est nécessaire d'avoir une quantité d'analyses mais il faut également avoir des analyses de qualité.

Les méthodes statistiques d'échantillonnage et d'examen des résultats ont permis dans ces dernières années de reconsidérer la valeur des analyses données par les méthodes traditionnelles. Plusieurs faits majeurs ont apparu :

1) l'échantillonnage effectué sur des prélèvements trop petits, ou la préparation incorrecte de ces prélèvements entraînent des erreurs énormes sur les résultats au point de défigurer totalement les conclusions pétrographiques [34].

2) les analyses traditionnelles de roches, lentes et coûteuses, sont entachées d'erreurs appréciables [2]. En fait, elles ne sont pas toujours supérieures aux méthodes physico-chimiques modernes, beaucoup plus rapides et dont la fidélité et la précision peuvent être définies et contrôlées.

3) les milieux pétrochimiques, même homogènes comme le granite, présentent des fluctuations statistiques de composition chimique qui doivent être étudiées en elles-mêmes avant de conclure à des migrations de matière.

4) la précision (qui coûte cher) doit être en rapport avec le problème géochimique.

5) le rite quasi obligatoire du dosage des 13 éléments majeurs montre que le pétrographe reste très lié aux classifications minéralogiques et à la reconstitution des minéraux virtuels. Il attache également souvent une importance trop grande au calcul de paramètres qui cumulent toutes les erreurs et les fluctuations statistiques indépendantes des divers éléments qui y rentrent.

Nous montrerons comment, pour le prix et le temps de 3 ou 4 analyses complètes de roche, il est possible d'obtenir, sur 20 ou 30 échantillons, des dosages d'un ou deux éléments seulement mais caractéristiques de la roche et de résoudre le problème de l'existence réelle d'une ou plusieurs familles de roche.

6) le comportement des éléments en traces et la loi de répartition présentent un intérêt considérable pour la géochimie. Mais ces lois de répartition n'ont de sens que si les dosages sont faits dans des familles de roches géologiquement et statistiquement homogènes (nous définissons par ailleurs le sens précis d'homogène), et non au hasard dans des échantillons de " tiroirs ", détachés de leur contexte géologique.

Nous voyons donc en résumé que les résultats des analyses de roches sont perturbés :

- a) par la non-homogénéité de la roche ;
- b) par les erreurs d'échantillonnage dues à la taille des grains ;
- c) par les erreurs de broyage ;
- d) par les erreurs dues aux opérations chimiques ;

a) est une réalité géochimique qu'il est fondamental d'étudier en elle-même. Pour que cette étude soit valable, il est nécessaire que les erreurs de b), c) et d) soient faibles devant les fluctuations de a).

Mais cette condition nécessaire est aussi suffisante, et il n'est pas besoin pour étudier des fluctuations géochimiques de 10 ou 20 pour cent de disposer d'une méthode analytique à 1 pour 1 000.

I - PRELEVEMENTS.

Nous avons voulu appliquer à nos techniques de prélèvements un esprit réellement géochimique afin d'obtenir des échantillons géologiquement et statistiquement significatifs.

Nous avons prélevé les roches en affleurement ou en carrière, cherchant à obtenir les parties les plus fraîches et les moins altérées. Ces prélèvements ont été répartis aussi régulièrement que possible sur l'étendue des massifs. Le recouvrement ne nous a pas permis, du moins en France, d'obtenir un quadrillage rigoureusement kilométrique ; mais la densité des échantillons s'est maintenue à environ un échantillon pour trois kilomètres carrés.

Nous avons été largement aidés dans ce travail par les cartes d'affleurements des Divisions Minières et souvent même par les géologues et prospecteurs du C.E.A. travaillant dans les secteurs et nous conduisant à coup sûr à de bons affleurements.

Il est vrai que l'on pourrait critiquer ce mode d'échantillonnage en surface, mais la surface actuelle représente un niveau d'érosion qui nous conduit en fait au coeur des massifs. Il est évident que des prélèvements par carottes de sondage seraient plus rationnels. Mais étant donné le prix de revient du mètre de sondage dans le cristallin, la pratique du sondage géologique systématique en période d'exploration n'est malheureusement pas encore passée dans les habitudes en France. De toutes manières, les demi-mesures dans ce domaine (petites fouilles ou sondages à quelques mètres) seraient illusoire. Nous avons pu vérifier dans les travaux miniers des zones étudiées que l'altération descend souvent à plusieurs dizaines de mètres, et que d'ailleurs les quelques échantillons de grandes profondeurs que nous avons analysés ne sortaient pas des distributions statistiques des échantillons de surface. Une étude systématique de ce problème est en cours à l'Université de Nancy et des comparaisons valables pourront donc être établies dans un proche avenir.

Si la prise de l'échantillon ne présente donc rien de particulier du point de vue du choix qualitatif, il n'en est pas de même pour le choix de la taille de l'échantillon prélevé. Nous avons appliqué scrupuleusement les règles préconisées par Monsieur Laffitte [34], règles qui souvent paraissent sévères aux géologues, mais sur lesquelles nous avons été intransigeants :

Les roches grenues contiennent un nombre limité de cristaux. L'adjonction ou la perte d'un cristal introduit un changement de composition chimique de l'échantillon.

Deux cas étaient à considérer :

- granites à grains de même taille (Bretagne, Vendée) :

Le poids de nos échantillons a été de l'ordre de 3 à 4 kg, réalisant à coup sûr la condition d'être 10 000 fois supérieur au poids moyen des grains.

- granite porphyroïde (Grury) :

Le poids des prélèvements a dépassé 5 kg et a toujours été de l'ordre de 1 000 fois le poids des porphyroblastes (5 g environ). On peut estimer dans ces conditions que l'erreur d'échantillonnage reste très au-dessous des fluctuations géologiques.

Broyages et quartages.

L'échantillonnage ainsi conduit nous a amenés à la manipulation d'environ 3 tonnes de roches qu'il a fallu réduire par broyage.

Il était nécessaire en plus de réaliser ces opérations dans des conditions rigoureuses de propreté vis-à-vis de l'uranium. Nous avons dû par exemple rejeter comme suspects tous les échantillons broyés sur les divisions minières. Cette étude ne porte donc que sur des échantillons absolument sûrs.

Les échantillons, enveloppés et mis en caisse au fur et à mesure sur le terrain, ne sont déballés qu'à l'arrivée dans un atelier de broyage spécial rigoureusement interdit aux produits uranifères. Le traitement suivant a été adopté :

- 1) Concassage de tout l'échantillon (moins un témoin pétrographique) au millimètre, par concasseur à mâchoires.
- 2) Prise par quartage de 2 kg du broyat et passage direct et presque instantané à la maille 150 par broyeur à marteaux mobiles.
- 3) Prise par quartage de 300 g ainsi broyés pour les conserver dans un flacon.

Cette méthode qui réduit d'une manière considérable les erreurs dûes au broyage n'a été rendue possible que par l'emploi d'un broyeur particulièrement adapté et que nous avons longtemps cherché. Les divers broyeurs que nous avons essayés étaient soit trop lents, soit trop petits, ou alors provoquaient des séparations par poussières ou par clivage des micas.

Le Microfd Atomill (British Jeffrey) ne présente pas ces inconvénients. Il utilise une couronne de marteaux mobiles tournant à très grande vitesse (10 000 tours/minute). L'échantillon, préalablement amené au millimètre est percuté en plein vol et précipité vers les parois pour subir un nouveau choc. Il n'y a donc pas écrasement mais série de percussions violentes.

1 kgde roche granitique passe en 2 minutes environ. La granulométrie à la sortie est régulière et dépend du jeu de grilles utilisé et de l'usure des marteaux. Les pertes par poussières sont négligeables grâce à un circuit bien étanche.

Le broyeur est ouvert entre chaque roche et nettoyé à l'air comprimé. Les 100 premiers grammes de roches servent au rinçage et sont rejetés.

L'usure des marteaux est d'environ 50 g de perte de poids tous les 150 à 200 kg de roche. Cette pollution par les broyeurs est donc négligeable pour les analyses d'éléments majeurs et de l'uranium. Elle risquerait par contre d'être gênante pour l'étude d'autres oligo-éléments, tels que Mo, Ni, Cr et autres éléments contenus dans les aciers spéciaux.

Remarque.

Erreur introduite par le prélèvement de π grammes d'un tas a , les cristaux étant de taille supérieure à a (1 mm).

Un calcul développé dans l'ouvrage de M. Laffitte conduit à ceci :

L'erreur relative $\frac{2\sigma}{a}$ est proportionnelle à $\sqrt{\frac{\pi}{pa}}$,

π étant le poids du grain et
 pa le poids du prélèvement

$$\frac{2\sigma}{a} = 2K \sqrt{\frac{\pi}{pa}}$$

Le facteur K, variable avec l'élément, est de 0,26 pour la silice, par exemple, de 1,25 pour la chaux, et peut atteindre 10 pour certains éléments.

Dans notre cas :

$$\pi = 1^3 \times d = (0,1)^3 \times 2,5 \text{ g}$$

$$pa = 2000 \text{ g}$$

$$\frac{2\sigma}{a} = 2K \sqrt{\frac{2,5 \cdot 10^{-6}}{2}} = 1,1 \cdot 10^{-3} K$$

Même dans le cas exceptionnellement défavorable où $K = 10$,

$$\frac{2\sigma}{a} = 1,1 \text{ pour cent, erreur très acceptable.}$$

II - METHODES D'ANALYSE.

Observations générales.

Nous ne donnerons qu'un schéma succinct des méthodes employées. Certaines de ces méthodes, mises au point dans notre laboratoire, ont d'ailleurs fait l'objet de notes ou de rapports [14].

Par contre, nous donnerons les résultats d'analyses systématiques, répétées, pour le calcul des variances, sur des roches témoins.

Il est à noter que sous l'impulsion de M. le Professeur Roubaud, alors Directeur des Recherches Minières, la pratique de l'échange de dosages et de standards a été introduite depuis de longues années entre divers laboratoires du C.E.A., ainsi qu'entre des laboratoires d'université et notre laboratoire. La nécessité d'étalons de référence sur lesquels on puisse s'appuyer pour les mises au point et les essais de précision était apparue avant la publication de Fairbairn [18]. Ceci explique que nous nous soyons alignés depuis 1952 sur des standards à nous et non sur le fameux granite américain G.I. [18].

A - Analyses de Roches.

Nous distinguons dans ce travail un peu arbitrairement les "analyses classiques" de roches des "analyses rapides".

Les analyses classiques suivent les détails analytiques de l'école de Washington [57], Hillebrand [27] et Groves [25]. Les éléments sont dosés en cascade et généralement par gravimétrie. Ces méthodes présentent l'avantage d'avoir fait leurs preuves et d'être sûres quels que soient les constituants de la roche. Elles ont par contre l'inconvénient d'être longues et de s'adapter très mal à des analyses en grande série.

Le tableau suivant donne, d'après Fairbairn, les erreurs relatives que l'on peut en attendre sur les constituants principaux d'un granite.

$\bar{x}$ étant la moyenne arithmétique ;

n le nombre de mesures ;

$$\sigma^2 = \frac{\sum d^2}{n}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sigma^2}{n-1}} = \text{écart-type d'une seule mesure ;}$$

$$C = \frac{\sigma}{\bar{x}} = \text{écart-type relatif ;}$$

$$\frac{2\sigma}{\bar{x}} = \text{erreur relative maximum.}$$

Constituants	Teneurs en pourcentage	Ecart-type relatif en pourcentage	Erreur relative maximum en pourcentage
SiO ₂	72,9	0,5	1
Al ₂ O ₃	13,9	2,2	4,4
K ₂ O	5,4	6,8	13,6
Na ₂ O	2,0	9,3	18,6
CaO	1,4	8,2	16,4
FeO	0,99	13,5	27,0
MgO	0,39	27	54
TiO ₂	0,25	17	34
P ₂ O ₅	0,09	39	78
MnO	0,027	28	56

La méthode rapide réduite dérive de celle de Shapiro et Brannock [52] pour les opérations d'attaque et de séparation. Elle permet le dosage sur la même attaque de Na₂O, K₂O, CaO, MgO, Fe₂O₃, Al₂O₃ (et de TiO₂, MnO, P₂O₅). Les manipulations sont menées en parallèle sur des séries de 10 ou 20 échantillons. 15 à 20 analyses réduites de 6 éléments peuvent être aisément faites par semaine.

L'étude des variances a été menée par analyses répétées sur un même échantillon à des périodes différentes par un même opérateur.

Analyses Classiques

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O ^x	Na ₂ O ^x	FeO	Fe ₂ O ₃ total
- moyenne observée	66,6	15,20	2,90	1,90	4,90	3,12	3,10	4,3
- nombre de mesures	6	6	6	6	12	12	6	6
- variance	0,006	0,012	0,007	0,015			0,012	0,026
- écart-type	0,08	0,11	0,08	0,12	0,01	0,01	0,11	0,16
- erreur relative maximum en pourcentage	0,30	1,5	6	13	0,4	0,6	7	8
- écart-type relatif en pourcentage	0,15	0,8	3	6,5	0,2	0,3	3,5	4
x - les alcalins ont été dosés par spectrométrie de flamme sur attaque spéciale après dilution convenable.								

Analyse rapide du même échantillon

	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O ^x	Na ₂ O ^x	Fe ₂ O ₃ total
- moyenne observée	14,6	2,8	1,8	4,9	3,12	4,4
- nombre de mesures	10	12	12	12	12	12
- variance	0,056	0,034	0,027	très faible	très faible	0,017
- écart-type	0,21	0,18	0,16	0,01	0,01	0,13
- écart-type relatif en pourcentage	1,5	6	9	0,2	0,3	3
- erreur relative maximum en pourcentage	3	12	18	0,4	0,6	6,5
x - les alcalins sont dosés par spectrométrie de flamme sur la solution de CaO MgO.						

Les écarts-types de la méthode rapide sont acceptables pour Al₂O₃, CaO, Fe₂O₃, K₂O, Na₂O, et correspondent à des erreurs relatives maximum faibles devant les fluctuations géologiques.

L'erreur relative maximum est appréciable pour la magnésie mais on ne peut pas dire que cette erreur (18 pour cent) soit tellement plus faible par la méthode classique (13 pour cent). Dans un cas (classique), MgO est dosé en fin d'analyse dans une solution qui a pu être polluée par toutes les opérations antérieures. Dans l'autre (rapide), MgO est obtenu par différence de (CaO + MgO) moins CaO ; il accumule donc les erreurs de deux volumétries. Dans ce cas, l'erreur relative pourrait être réduite par prise d'une aliquote plus forte.

Cela n'entraîne de toutes manières aucune conséquence pour notre travail.

B - Dosages de l'Uranium.

Tous nos dosages d'uranium reposent sur la méthode fluorimétrique, méthode actuellement parfaitement classique [24]. Quelques échantillons ont été dosés, pour le contrôle, par activation neutronique

(par M. Chauvin, de la Section des Teneurs), et par mesure de l'équilibre U - Ra (par M. Meggy, du Service Electrique). L'accord entre ces trois méthodes a été concluant.

Rappelons qu'une trace d'uranium fondu dans un flux à base de fluorure de sodium provoque, dans la perle ainsi formée, une fluorescence jaune excitée par la lumière ultraviolette. L'intensité de la fluorescence est mesurée par des dispositifs photoélectriques convenables et comparée à des étalons obtenus dans les mêmes conditions. Un certain nombre d'éléments viennent inhiber ou exalter cette fluorescence et doivent être éliminés.

Cette méthode, moyennant un certain nombre de précautions, permet de doser des quantités d'uranium présentes dans la perle, de l'ordre de 10^{-8} gramme.

Nous distinguerons donc 3 phases principales :

- l'attaque ;
- la séparation ;
- le dosage ;

a) Attaque

Nous utilisons dans ce travail deux appellations :

- dosage de l'uranium total : c'est le dosage de l'uranium réellement présent dans les roches ; il est obtenu par attaque et désagrégation complète. Cette définition est précise et universelle.
- dosage de l'uranium soluble. Cette définition, par contre, est arbitraire et conventionnelle : c'est le dosage de l'uranium qui passe en solution d'un échantillon broyé à la maille 150 dans l'acide nitrique ($d = 1,33$) dilué au quart après une attaque de 2 h au bain-marie.

Nos deux dosages correspondent donc en fait à deux modes d'attaque différents. On aboutit dans les deux cas à une solution nitrique jaugée.

b) Séparation.

Deux méthodes ont été utilisées :

- l'extraction de l'uranium en ampoule par le tributyl phosphate ;
- l'extraction de l'uranium par chromatographie sur papier.

Tous nos échantillons ont fait l'objet pour l'uranium total de deux attaques complètes, l'une traitée par extraction en ampoule, l'autre traitée par chromatographie en double exemplaire.

Tous les échantillons ont fait l'objet pour l'uranium soluble d'une seule attaque et d'une extraction par chromatographie en double exemplaire.

Il est apparu que l'extraction par ampoule n'était pas totale et devait être affectée d'un coefficient correctif. Les dosages ainsi obtenus n'ont donc été conservés qu'à titre de contrôle des erreurs accidentelles grossières.

c) Dosage.

Le dosage proprement dit se fait par fluorimétrie dans des petites nacelles de platine.

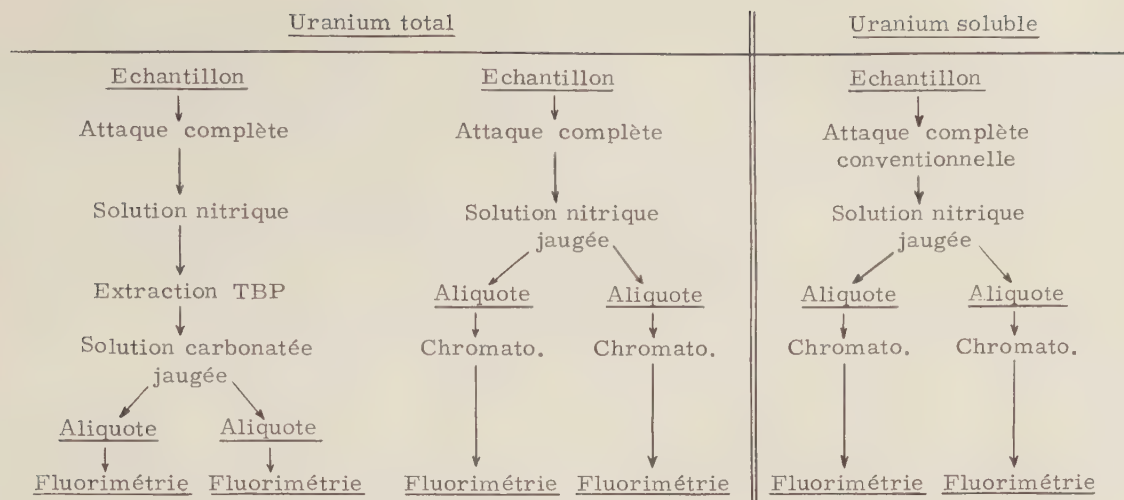
Les échantillons à doser sont soigneusement encadrés par des étalons et des blancs qui suivent strictement le même processus de fusion.

Précautions spéciales : Ces analyses se font avec un grand luxe de précautions dans un laboratoire spécial dont l'entrée est rigoureusement interdite à toutes les personnes pouvant être "polluées".

La vaisselle est lavée au Teepol, Nab, etc. Nous rejetons tout récipient ayant contenu une solution supérieure à 50 microgrammes par centimètre cube.

Les nacelles ne sont touchées qu'avec des pinces et subissent des contrôles extrêmement fréquents. L'expérience nous a montré que ces précautions étaient indispensables.

Les trois schémas suivants résument les opérations :



Précision des mesures.

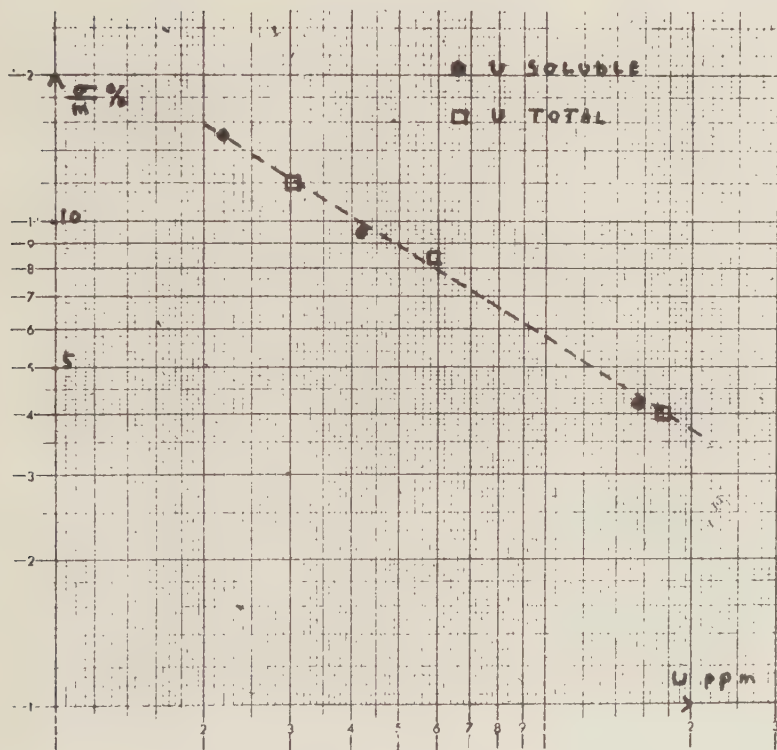
La méthode d'extraction sur papier et fluorimétrie que nous avons mise au point, en collaboration avec M. Goldsztein, il y a plusieurs années [14] est utilisée industriellement, en dehors de notre laboratoire, par quatre laboratoires fixes et 4 groupes mobiles de prospection géochimique, qui dosent l'uranium soluble dans les matériaux les plus divers.

Des contrôles constants par échange d'échantillons et de standards sont effectués. Des recouplements périodiques par d'autres méthodes (mais toujours fluorimétriques) sont faits par des laboratoires de contrôle, soit des Services des Teneurs, soit des Services de Chimie du C.E.A. L'expérience porte actuellement sur près de 100 000 dosages.

L'analyse de l'uranium dans les roches paraissant cependant plus délicate, nous avons cru nécessaire de faire un certain nombre de contrôles supplémentaires. Nous avons effectué :

- 1) des manipulations à blanc pour vérifier les réactifs ;
- 2) des manipulations avec standards de 1 μ g à 20 μ g ;
- 3) des manipulations avec roches stériles ;
- 4) des manipulations avec roches stériles plus standards de 1 μ g à 20 μ g.

Tous ces essais ayant été satisfaisants, nous nous sommes proposés de déterminer les précisions dans les gammes utilisées.



Uranium total

Echantillon	1	2	3
Nombre d'essais	8	8	8
Moyenne (ppm)	3	5,9	17
σ^2	0,13	0,21	0,45
σ	0,36	0,46	0,68
$\frac{2\sigma}{m}$ en pourcentage	24	17	8

Uranium soluble

Echantillon	1	2	3
Nombre d'essais	12	12	12
Moyenne (ppm)	2,2	4,2	15,6
σ^2	0,097	0,169	0,450
σ	0,31	0,41	0,67
$\frac{2\sigma}{m}$ en pourcentage	30	19	8,5

On constate comme toujours que l'écart-type relatif croit lorsque la teneur diminue. Si l'on porte sur un graphique bilogarithmique, en abscisse la teneur et en ordonnée les écarts-types relatifs, nous voyons les points expérimentaux des deux méthodes (soluble et total) s'aligner sur la même droite. Pour une teneur en uranium donnée, les deux dosages ont donc la même précision.

Si nous obtenons sur un échantillon inconnu x_i une moyenne sur 2 résultats de 4 ppm par exemple, le σ pour 4 ppm, donné par le graphique est 0,40 ; la fluctuation sur la moyenne de 2 résultats est $\frac{0,4}{\sqrt{2}}$. La confiance dans la moyenne est donc :

- condition normale : 70 chances sur 100, soit $3,7 < x_i < 4,3$;
- condition sévère : 95 chances sur 100, soit $3,4 < x_i < 4,6$.

La précision est très largement suffisante pour l'étude de fluctuations d'uranium entre 2 ppm et 20 ppm.

III - INTERPRETATION STATISTIQUE.

Même si l'on fait un très grand nombre de prélèvements, on est pratiquement amené à ne mettre en jeu qu'un nombre fini d'observations.

On peut cependant considérer que l'ensemble des observations recueillies est le résultat d'un échantillonnage effectué au sein d'une population hypothétique infinie, douée des mêmes propriétés que la population effectivement étudiée.

On arrive ainsi à la notion de population de référence de tout l'ensemble des observations expérimentales.

Le problème consiste à caractériser, à partir des données expérimentales, le type de la loi de référence, puis à préciser cette loi par estimation des paramètres qui la définissent.

L'expérience montre que les distributions empiriques suggèrent des "permanences statistiques" apparaissant dans les phénomènes les plus divers. On essaye de raccorder la distribution expérimentale à une loi de probabilité fondamentale.

Le problème ainsi posé conduit à :

- 1) se fixer à priori une loi de référence qui semble logique ;
- 2) estimer les paramètres définissant la loi spécifiée ;

3) tester la validité de cette spécification.

Notion de caractère.

Une population n'est définie qu'après détermination de ce que l'on se propose d'observer, c'est-à-dire qu'après définition du caractère à examiner.

Le caractère peut être qualitatif ou quantitatif, continu ou discontinu, simple ou complexe.

Les caractères que nous étudierons seront quantitatifs et continus (teneurs en éléments).

Notion d'homogénéité d'un ensemble d'observations statistiques

Etant donné une population d'individus, nous appellerons :

- population hétérogène celle pouvant être subdivisée en sous-population, se raccordant elles-mêmes à des populations de références différentes.
- population homogène, toute population dont la distribution pourra être raccordée à une seule loi de référence.

Présentation des données.

Lorsque les N individus soumis à l'observation ont été observés, il s'agit de présenter correctement les résultats.

a) Notion de distribution statistique.

La première opération consiste à grouper ensemble les individus qui ont les mêmes valeurs du caractère examiné. On obtient ainsi une "distribution statistique", ou "distribution empirique".

Il est commode d'effectuer un "groupage en classes". On divise l'intervalle dans lequel varie le caractère étudié en classes et on groupe ensemble les valeurs observées tombant dans la même classe. Nous avons donc des "frontières de classes" et une "valeur centrale" pour chaque classe.

Un tableau peut être dressé, où l'on porte à la fois les effectifs par classe et également la fréquence : $f_i = \frac{n_i}{N}$.

f_i = fréquence dans la classe i ;

n_i = effectif de la classe i ;

N = nombre total d'observations.

b) Représentation graphique des distributions.

Histogramme

On porte en abscisse les frontières de classe et en ordonnées les effectifs, ou mieux, la fréquence. On construit ainsi une succession de rectangles accolés appelée histogramme

Courbe de fréquence

La courbe de fréquence vient d'un "lissage" de l'histogramme.

Le concept de courbe de fréquence d'une série statistique est de la plus haute importance. Celle-ci est considérée comme la représentation géométrique d'une loi idéale de distribution du caractère étudié.

c) Description des distributions statistiques.

Les distributions ainsi obtenues se présentent sous forme de tableaux numériques comprenant un grand nombre de chiffres.

Il s'agit de synthétiser ces résultats avec un petit nombre de paramètres permettant de dégager les traits principaux.

Caractéristiques de tendance centrale

- le mode : c'est la valeur du caractère correspondant au plus grand nombre d'observations ;
- la médiane : c'est la valeur du caractère autour de laquelle se partagent par moitié les valeurs observées.;
- la moyenne arithmétique ;
- la moyenne géométrique : c'est la racine $n^{\text{ième}}$ du produit de n données.

Le logarithme de la moyenne géométrique de plusieurs données est la moyenne arithmétique des logarithmes de ces données.

Lorsque une série de données présente une grande dissymétrie, la moyenne géométrique est plus utile que la moyenne arithmétique.

Caractéristiques de dispersion .

- l'écart moyen :

$$\bar{e} = \sum_{i=1}^n n_i \frac{|x_i - m_i|}{N}$$

On forme pour chaque observation la différence en valeur absolue entre sa valeur et la moyenne de la distribution, puis on divise la somme des différences obtenues par le nombre total d'observations.

C'est une valeur difficile à manier et peu utilisée.

- la variance et l'écart-type.

On remplace dans la formule précédente les $x_i - m_i$ par leurs carrés :

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n n_i \frac{|x_i - m_i|^2}{N}$$

σ est l'écart-type. C'est l'indice le plus utilisé.

Ajustement d'une courbe à des données.

Nous n'entrerons pas dans le détail ; disons seulement que l'examen de la courbe de fréquence conduit à penser que le caractère étudié s'ajuste à un "loi statistique". Parmi ces lois, quatre sont particulièrement importantes.

- Loi de Poisson ;
- Loi binomiale ;
- Loi normale, ou loi de Gauss-Laplace, ou courbe en cloche ; c'est la loi la plus connue, mais ce serait une erreur de croire que c'est la seule loi du hasard. C'est la loi que l'on obtient lorsque les causes initiales jouent de manière indépendante en s'ajoutant.
- Loi lognormale, ou loi logarithmo-normale. C'est une généralisation de la loi normale où l'on a fait un changement de variable. La loi redevient normale en partant des logarithmes du caractère en abscisse.

Cette loi est générale lorsque les causes initiales indépendantes agissent de manière multiplicative.

Cette loi est probablement plus répandue que la loi normale. Elle est en fait l'expression de la loi d'action de masse.

Signalons que :

- le revenu des individus composant une nation ;
- la taille des grains dans les échantillons de roches sédimentaires ;
- la taille des grains d'argent dans une émulsion photographique ;
- la sensibilité des animaux d'une même espèce aux produits chimiques ;
- la quantité d'électricité utilisée aux U. S. A. dans les maisons de classes moyennes ;
- les teneurs en or dans les mines du Rand ;
- les teneurs des métaux dans une roche ;
- le nombre de mots dans les phrases de l'oeuvre de G. B. Shaw ;
- la dispersion du tir des mortiers ;

et bien d'autres grandeurs, suivent la loi lognormale.

Définition mathématique de la loi lognormale.

Soit $\text{Log } \gamma$ (logarithme népérien), la valeur moyenne de $\text{Log } x$ et σ^2 sa variance. La probabilité pour que $\text{Log } x$ soit compris entre $\text{Log } x$ et $\text{Log } x + d(\text{Log } x)$ est, si $\text{Log } x$ est une variable normale :

$$\begin{aligned} p(x) dx &= \frac{1}{2 \pi \sigma} e^{-\frac{(\text{Log } x - \text{Log } \gamma)^2}{2 \sigma^2}} d(\text{Log } x) \\ &= \frac{1}{2 \pi \sigma} e^{-\frac{(\text{Log } \frac{x}{\gamma})^2}{2 \sigma^2}} \frac{dx}{x} \end{aligned}$$

La fonction de fréquence ou densité de probabilité est :

$$p(x) = \frac{1}{x \sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(\text{Log } x - \text{Log } \gamma)^2}{2\sigma^2}}$$

On a intérêt à effectuer un changement de variable :

$$z = \frac{1}{\sigma} \text{Log } \frac{x}{\gamma}$$

$$p(x) dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz$$

z est une variable normale réduite.

$$G(z) = \int_z^\omega \frac{e^{-\frac{z^2}{2}}}{\sqrt{2\pi}} dz \text{ est :}$$

la loi de probabilité totale de la loi normale.

Deux paramètres suffisent à déterminer la loi : [la médiane γ : par définition, $\text{Log } \gamma$ est la valeur moyenne de $\text{Log } x$ γ est à la fois la médiane, et la moyenne géométrique de $\text{Log } x$, puisque $\text{Log } \gamma$ est la moyenne arithmétique de $\text{Log } x$, [la variance σ^2 : c'est la variance de $\text{Log } x$.

Droite de Henry :

Nous n'entrerons pas dans la théorie de la droite de Henry. Mais nous expliquerons l'utilisation du papier Gausso-logarithmique qui simplifie considérablement les calculs et que nous avons utilisé systématiquement pour nos représentations. Si

$$z = \frac{1}{\sigma} \text{Log } \frac{x}{\gamma}$$

$$G(z) = \int_z^\omega \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz$$

Les coordonnées du papier gausso-logarithmique sont :

- abscisses : $\xi = 10 \log x$ cm ;
- ordonnées : la fonction $G(z)$ $\eta = 5 z$ cm.

Pratiquement, on répartit les N teneurs observées en n classes :

$$x_{i-1} < x < x_i$$

Pour chaque classe, on calcule la fréquence relative : $f_i = \frac{N_i}{N}$ et la fréquence cumulée $F_i = \sum_1^i f_i$.

On porte les classes en abscisses sur le papier gausso-logarithmique et les fréquences cumulées en ordonnées.

Si la loi est lognormale, les points ainsi définis s'alignent sur une droite dite droite de Henry.

La médiane est l'abscisse de l'intersection de la droite avec l'axe des 50 pour cent.

L'écart-type est l'inverse de la pente de la droite, compte-tenu du fait que l'échelle des ordonnées est 5, celle des abscisses étant 10.

Notion de corrélation

Nous avons considéré jusqu'ici des examens de chaque caractère (teneurs en éléments) pris séparément. Lorsqu'on désire observer simultanément 2 caractères, on conçoit plusieurs possibilités :

1) celle de la dépendance fonctionnelle des deux caractères. Si l'on porte sur un graphique, en abscisse un caractère et en ordonnée l'autre, les points expérimentaux viendront se grouper autour d'une courbe bien définie exprimant la relation.

2) celle de l'indépendance. Les points expérimentaux viendront couvrir au hasard le plan du graphique.

3) entre ces deux possibilités extrêmes, il peut exister des relations entre les 2 caractères difficiles à exprimer par une loi ; c'est ce que l'on appelle la dépendance statistique. La corrélation est "le degré de similitude en grandeur et en sens, des variations entre les valeurs correspondantes des 2 caractères". Au point de vue graphique, nous voyons les points se grouper dans une surface elliptique dite ellipse de corrélation.

Si les deux variables x et y (de moyenne $\bar{x}$ et $\bar{y}$, d'écart-type σ_1 et σ_2) suivent des lois normales, on calcule le coefficient de corrélation :

$$r = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sigma_1 \cdot \sigma_2}$$

On démontre que le coefficient r est compris entre -1 et $+1$ et donne une mesure du degré de dépendance :

$r = 0$ signifie l'indépendance ;

$r = \pm 1$ signifie l'existence d'une relation fonctionnelle entre x et y .

Etant donné que dans les cas qui nous intéressent, les variables X et Y ne sont pas normales, mais lognormales, le calcul des corrélations peut être étendu à cette éventualité. Si X et Y ont des médianes γ_1 et γ_2 , des écarts-types logarithmiques σ_1 et σ_2 .

$$r = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \frac{(\text{Log } x - \text{Log } \gamma_1)(\text{Log } y - \text{Log } \gamma_2)}{\sigma_1 \sigma_2}$$

Calcul graphique de r [39].

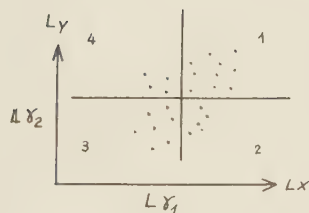
Monsieur Matheron donne un calcul approché de r par graphique. On construit le nuage de corrélation en coordonnées bilogarithmiques. On trace les axes passant par le centre de gravité ($\text{Log } \gamma_1$, $\text{Log } \gamma_2$). On compte les points contenus dans chaque quadrant.

Si N_1 est le nombre de points dans 1 et 3 ;

N_2 " " " " " " " 2 et 4.

$$r = \sin \frac{\pi}{2} \cdot \frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2}$$

Le coefficient de corrélation permet seul de substituer à la notion géologique de liaison entre deux éléments une mesure de dépendance et ainsi de remonter aux équations physico-chimiques mises en jeu.



CHAPITRE II

ÉTUDES RÉGIONALES

Il y a plusieurs manières d'envisager l'étude de la répartition et de l'abondance d'un élément dans la croûte terrestre.

On peut par exemple doser un grand nombre d'échantillons divers, pris dans des collections de musées. Cette façon de procéder est parfaitement légitime pour faire un premier tour d'horizon et obtenir quelques ordres de grandeur.

Mais seule l'accumulation méthodique d'études régionales détaillées peut amener à une connaissance réelle des abondances et du comportement géochimique des éléments en petite quantité dans les différentes géosphères.

Nos travaux se sont tout naturellement orientés vers des secteurs où le Commissariat à l'Energie Atomique faisait des prospections intensives.

A côté des travaux immédiatement utilitaires tels que la mise au point des techniques de prospection géochimique [13], et après quelques investigations préliminaires prometteuses [15], il est rapidement apparu nécessaire de poursuivre des recherches fondamentales sur le comportement géochimique de l'uranium dans les roches ignées, mais dans des cadres géographique et pétrochimique précis. Quatre secteurs ont été ainsi choisis.:

- d'une part, 3 massifs granitiques se rattachant à la phase hercynienne dont on sait l'importance majeure dans la métallogénie uranifère.
- d'autre part, un massif granitique totalement différent par sa situation géographique (Hoggar) et son âge (précambrien).

On peut subdiviser les granites métropolitains en deux groupes :

a) les granites de Vendée et de Bretagne Sud : ces granites semblent prolonger les granites du Limousin. Ils s'étirent de Parthenay à Nantes et se continuent dans toute la Bretagne méridionale par une bande étroite où les caractères deviennent de plus en plus syncinématiques.

Il était intéressant de vérifier dans ce cas les analogies géochimiques réelles de deux massifs géographiquement séparés mais présentant une forte continuité morphologique.

b) le massif de Luz y : batholite granitique de la région du Morvan, formant un relais entre le Massif Central et les Vosges et de type postorogénique.

Nous pouvions espérer, par ce choix, dégager des facteurs géochimiques de ressemblance ou de dissemblance et tenter de les expliquer par des processus physico-chimiques et géologiques.

Nous avons donc utilisé systématiquement sur ces régions les outils d'investigation décrits au premier chapitre.

Nous exposons, dans ce nouveau chapitre, les résultats mis sous des formes synthétiques permettant dans chaque cas de voir, d'un coup d'oeil, les lois de distribution des éléments intéressants dans des familles de roches pétrochimiquement définies.

Nous estimons en effet absolument nécessaire de déterminer, en premier lieu, le cadre géochimique général et, seulement par la suite, d'étudier le comportement de l'uranium, ceci afin de pouvoir, autant que possible, séparer les effets "primaires" liés à une pétrogénèse normale, des effets "secondaires" dus à la présence de perturbations locales (gisements).

A - VENDEE

I - CADRE GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE. (carte n° 1)

La zone étudiée s'étend entre Clisson, Mortagne, les Herbiers, et mord largement à l'Est, au-delà de La Chapelle - Largeau, sur le granite dit de Chatillon. [51].

Ce massif est bordé au Nord par des schistes briovériens avec contact par faille. Au contraire, au sud, le granite développe une auréole de métamorphisme dans les terrains encaissants.

II - CADRE GEOCHIMIQUE.

Le massif de Mortagne a été, historiquement, le premier étudié. Nous montrerons les étapes successives de la détermination d'un cadre géochimique et l'évolution de nos conceptions dans ce domaine.

1) Une première campagne de prélèvements nous a conduits à l'échantillonnage classique d'un petit nombre de roches macroscopiquement différentes et couramment baptisées : "le" granite des Brosses, "le" granite de l'Ecarpière, "le" granite de La Chèvre et celui de Montigné.

Soit 7 échantillons dont les analyses sont données au tableau Ia.

Les deux roches de l'Ecarpière correspondent en fait à un accident géologique limité et reconnu. Les deux roches de Montigné, prélevées à quelques mètres de distance, dans la même carrière, ne se distinguent que par une différence de coloration. On peut voir que :

SiO ₂	varie de	63,30 à 72,02	pour cent.
CaO	" "	0,45 à 1,74	pour cent.
Na ₂ O	" "	1,75 à 4,72	pour cent.
K ₂ O	" "	1,95 à 5,30	pour cent.
FeO	" "	0,52 à 3,80	pour cent.
Fe ₂ O ₃	" "	0,44 à 1,38	pour cent.

Un aussi grand nombre de dosages, délicats et longs, ne nous a objectivement conduits à aucune conclusion; il ne doit surtout pas accréditer l'idée que ces roches isolées et dispersées à travers le massif sont réellement différentes, puisque rien ne permet de répondre aux questions suivantes :

- quelles sont les compositions chimiques moyennes du massif étudié et les fluctuations autour de ces moyennes ?
- les roches prélevées sont-elles pétrochimiquement différentes ou des variations locales et normales d'une même famille ?

2) une deuxième campagne de 180 prélèvements a donc été effectuée selon les techniques exposées au premier chapitre.

Il n'était plus question sur un tel nombre d'échantillons d'effectuer des analyses classiques. La notion de caractère vient ici nous aider. SiO₂, Al₂O₃, K₂O, Na₂O, CaO, MgO, FeO, Fe₂O₃, sont les éléments majeurs des granites. Mais il n'est pas certain qu'ils soient tous des caractères majeurs pour le problème posé.

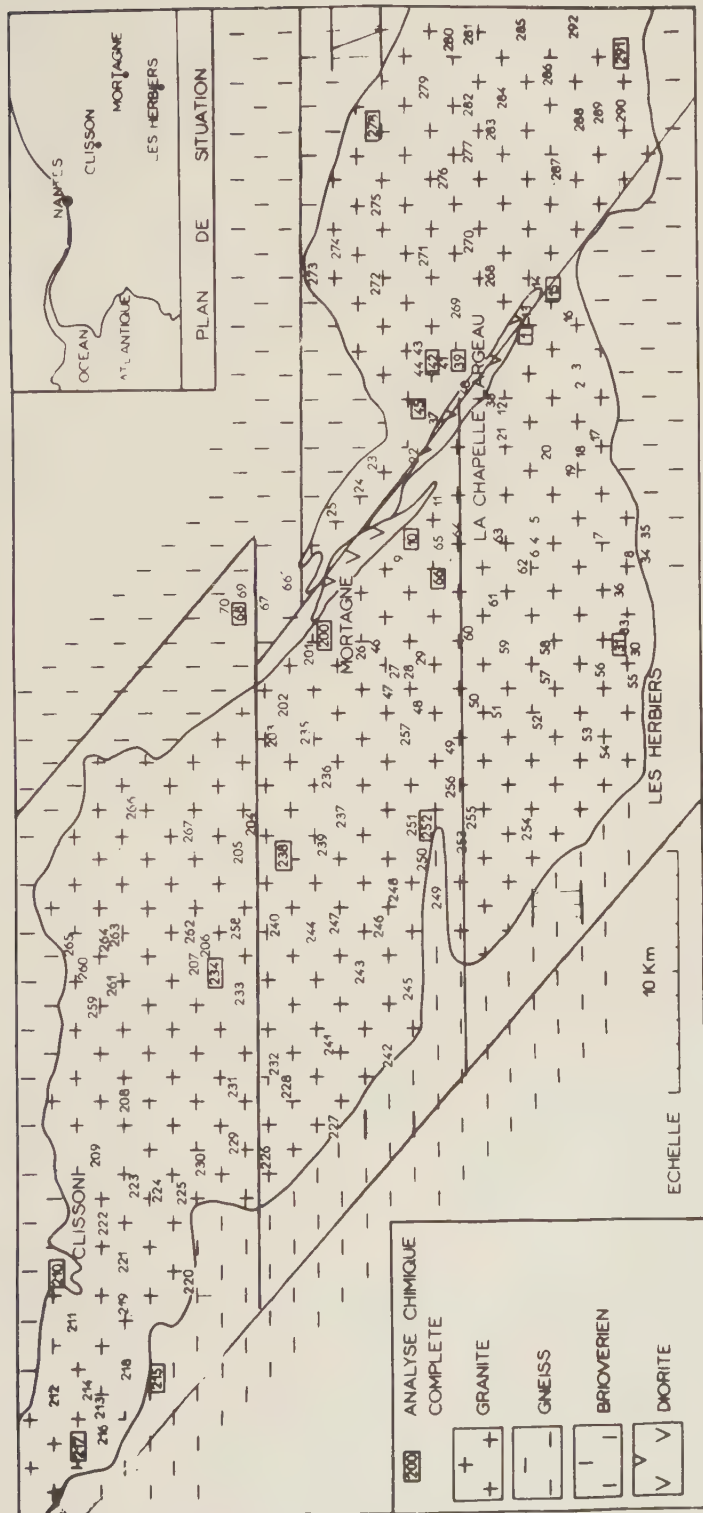
Par exemple, à partir du moment où l'on n'étudie que des granites, le caractère SiO₂ perd de son intérêt. En effet, SiO₂ global traduit mal les variations minéralogiques intéressantes à l'intérieur des échantillons : la présence de quartz "amortit" les fluctuations. Au contraire, c'est la nature des feldspaths qui est fondamentale et leurs variations se répercutent directement sur Na₂O, K₂O, CaO.

Montrons donc pratiquement la validité d'une réduction du nombre des caractères. Des 180 prélèvements, nous extrayons au hasard une sous-population de 68 échantillons sur lesquels des analyses réduites à Fe₂O₃, FeO, Na₂O, K₂O, CaO, MgO, sont effectuées.

SiO₂ est également dosé sur 22 échantillons (tableau Ia).

Une première observation, au simple regard des résultats d'analyses, permet de constater, à l'opposé des analyses précédentes, de forts groupements autour de certaines valeurs moyennes pour SiO₂, Al₂O₃, K₂O et Na₂O. Au concept divergent donné par les premières analyses se substitue un concept convergent d'une loi de distribution.

Pour des raisons théoriques et pratiques, que nous justifierons a posteriori, nous essayons systématiquement d'ajuster ces répartitions à des lois logarithmo-normales. Les teneurs sont découpées en tranches équilogarithmiques. Nous choisissons les tranches adaptées à l'ampleur des fluctuations expérimentales et à la précision des mesures. Par exemple, le découpage le plus utilisé est celui des tranches 0, 100 qui nous conduit à :



Carte I - Vendée
Massif de Mortagne

0 0,100 0,2 0,3 0,4 0,5 0,6 0,7 0,8 0,9 1

correspondant en teneurs à :

1 1,2 1,58 1,99 2,51 3,16 3,98 5,0 6,31 7,94 10

Nous groupons donc les teneurs par classes, et calculons les paramètres de la loi lognormale associée à ces données.

Exemple de calcul : Distribution de K_2O (68 analyses).

x = frontières de classes, en teneur pour cent ;

log x = frontières de classes, en logarithmes. ;

n = effectif ;

f pour cent = fréquence ;

f c = fréquence cumulée ;

e = $\log \gamma - \log x$;

x	log x	n	f %	f c %	n log x	e	e ²	ne ²
2,5	0,400	1	1,5	100	0,4	0,215	0,046	0,046
3,16	0,500	5	7,5	98,5	2,5	0,115	0,013	0,065
3,98	0,600	46	68	91	27,6	0,015	0,0002	0,009
5,01	0,700	16	23	23	11,2	0,085	0,007	0,140
		68			41,7			0,260

N = 68

$\log \gamma = \frac{n \log x}{N} + \text{terme correctif (nous avons confondu la frontière avec le centre de classe)} ;$

$\log \gamma = 0,615 + 0,050 = 0,665 ;$

$\gamma = 4,64$ pour cent (médiane)

$\sigma^2 = \frac{\sum ne^2}{N} = \frac{0,260}{68} = 0,0038$

$\sigma = 0,06$ (écart-type logarithmique) ;

m = 4,7 pour cent (moyenne arithmétique des résultats).

Les calculs effectués de la même manière sur les autres constituants conduisent aux résultats suivants :

Constituants	γ en pourcentage	m en pourcentage	σ
SiO_2	71	71	0,01
Al_2O_3	15,1	15,2	0,05
K_2O	4,6	4,7	0,06
Na_2O	3	3,1	0,07
CaO	0,8	0,9	0,16
Fe_2O_3	1,1	1,2	0,18
FeO	1	1,1	0,18
MgO	0,3	0,4	0,34

Ce tableau donne pour chaque élément :

- la médiane γ qui représente la valeur la plus fréquente rencontrée ;

- la moyenne arithmétique m qui représente l'abondance géochimique ;
- l'écart-type logarithmique σ qui donne la fluctuation géochimique de l'élément dans le massif.

Ces trois paramètres statistiques sont liés et deux seulement sont indépendants et suffisent à déterminer la loi de dispersion.

En particulier, la moyenne est d'autant plus écartée de la médiane que l'écart-type est plus grand.

Représentations graphiques.

a) histogrammes.

Les histogrammes de répartition ainsi définis peuvent être dessinés sur le même graphique (fig. 1).

Cette représentation visualise assez bien les valeurs caractéristiques et les fluctuations autour de ces valeurs, mais nous avons adopté une autre représentation plus précise et tout aussi simple, celle de la droite de Henry.

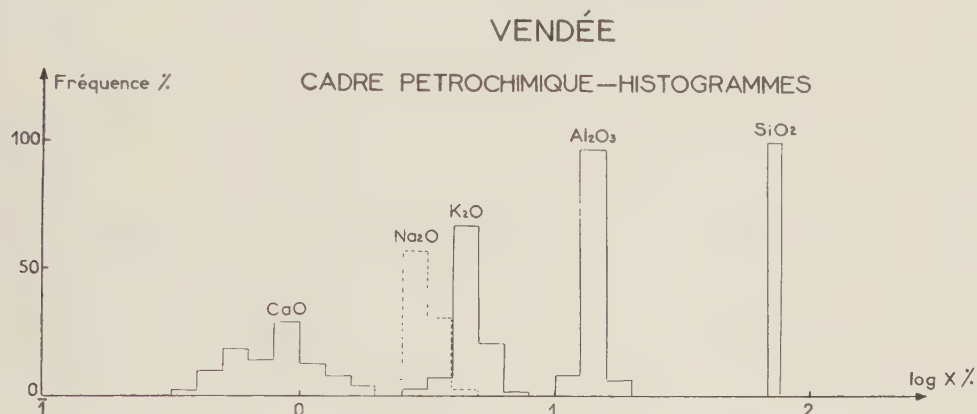


Figure 1 - Vendée
Cadre pétrochimique. Histogrammes.

b) droite de Henry.

Nous utilisons pour cette représentation du papier gaussio-logarithmique. On peut en envisager l'emploi de deux manières :

- si le caractère est peu dispersé, comme dans le cas de K_2O , le calcul est très rapide, et la droite est construite à partir des valeurs de γ et σ calculées. On porte à titre de vérification les effectifs cumulés pour s'assurer qu'ils sont voisins de la droite et que l'ajustement à une loi lognormale est justifié ;
- si au contraire le caractère est très dispersé et la loi bien lognormale, on a un grand nombre de tranches. Le report des fréquences cumulées donne un nombre de points suffisant pour définir une droite. Les paramètres sont alors mesurés graphiquement.

L'ensemble des données pétrochimiques caractéristiques est porté figure 2. On voit, pour chaque caractère majeur, à la fois sa valeur médiane, sa dispersion et la qualité de l'ajustement.

Nature des dispersions.

Nous mettons en second plan FeO , Fe_2O_3 , MgO , qui sont pour le problème présent, des caractères imprécis (σ élevé), ce qui traduit d'ailleurs les propriétés géochimiques d'éléments entrant dans de multiples processus. Evidemment, pour des comparaisons ultérieures avec d'autres granites, ces indices ferromagnésiens reprendront toute leur importance.

Pour des raisons inverses, nous considérons comme relativement secondaires les dispersions de SiO_2 et Al_2O_3 qui sont extrêmement faibles.

Nous portons notre attention sur K_2O , Na_2O et CaO . Les fluctuations observées peuvent être dues à des causes de pur hasard, à l'altération qui n'a pas joué également sur ces trois constituants, donc à des causes indépendantes. Mais les fluctuations peuvent être dues au remplacement d'un minéral par un autre, donc être en corrélation.

L'emploi des graphiques de corrélation nous conduit aux résultats suivants :

Corrélation K_2O / Na_2O $r = - 0,4$
 CaO / Na_2O $r = + 0,36$
 CaO / K_2O $r = - 0,31$

Ces valeurs sont faibles mais significativement non nulles. Les trois causes, (hasard, altération, remplacement), se sont additionnées, masquant partiellement les corrélations d'ordre géologique.

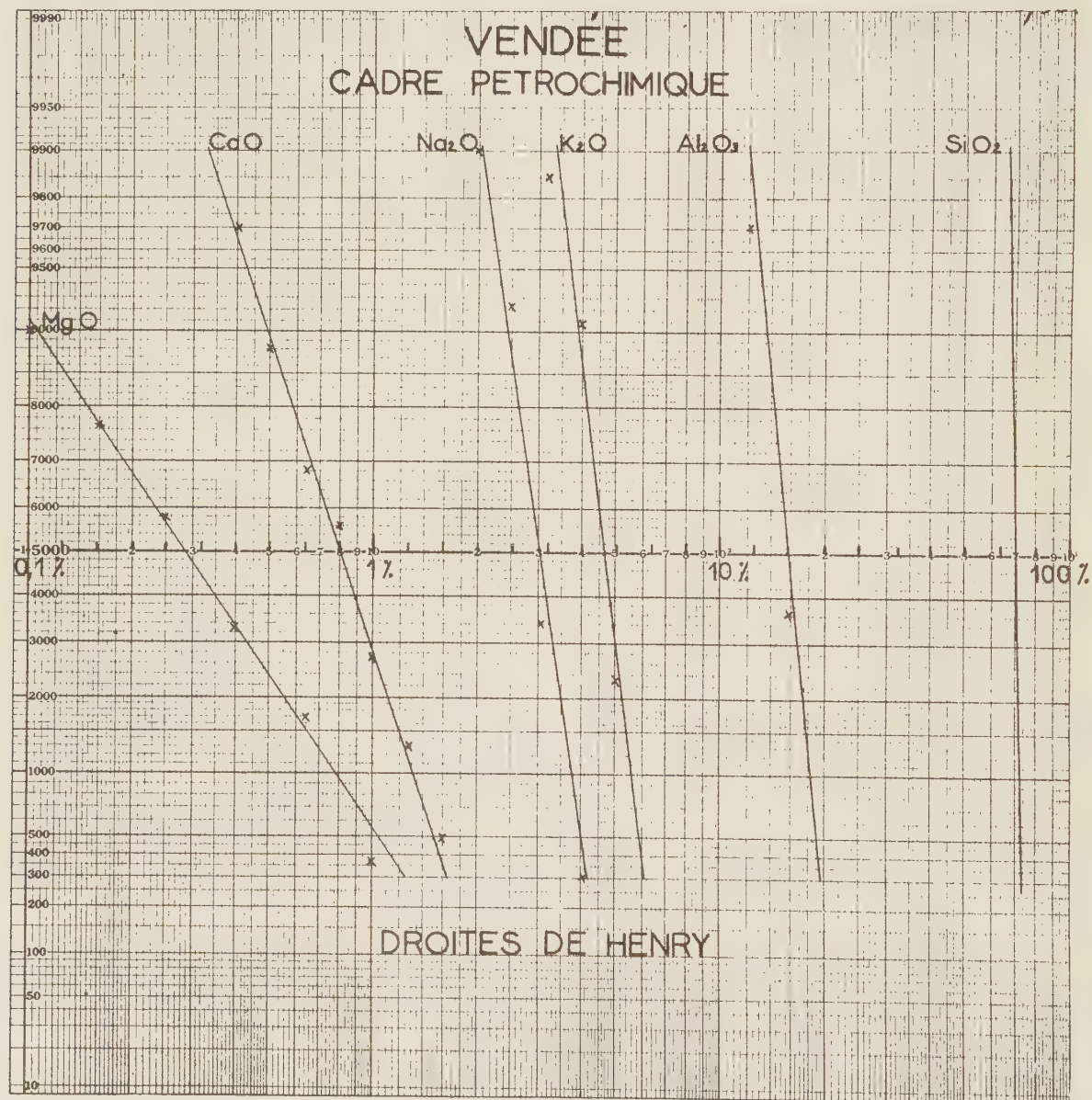


Figure 2 - Vendée
Cadre pétrochimique. Droites de Henry.

Ces corrélations s'expliquent parfaitement par des substitutions de feldspaths : lorsque les feldspaths potassiques augmentent, les feldspaths calco-sodiques diminuent.

Répartitions géographiques.

On peut se demander si ces variations de composition se font géographiquement au hasard ou si l'on peut définir des parties importantes du massif où la composition est différente des autres.

Nous découpons donc 4 panneaux comportant chacun une quarantaine de prélèvements. Sur ces échantillons, il suffit de suivre deux caractères seulement Na_2O et K_2O , dont le dosage est simple et précis. On peut dresser le tableau suivant :

Panneaux	K_2O		Na_2O	
	γ en pourcentage	σ	γ en pourcentage	σ
I	4,7	0,05	2,8	0,07
II	4,7	0,07	2,8	0,07
III	4,8	0,07	3,1	0,08
IV	4,3	0,05	3,3	0,08

En conclusion, les panneaux I, II, III ne présentent aucune variation significative de composition. Le panneau IV présente au contraire une différenciation faible mais significative, où la roche est moins potassique et plus sodique. (1)

Nous sommes en effet autorisés à parler de différenciation d'un même milieu géochimique car l'ajustement lognormal des panneaux I, II, III reste lognormal par adjonction du panneau IV, ce qui implique l'homogénéité de la population.

Résumé :	K_2O		Na_2O	
	γ en pourcentage	σ	γ en pourcentage	σ
I + II + III	4,7	0,07	2,9	0,08
IV	4,3	0,05	3,3	0,08

III - DISTRIBUTION DE L'URANIUM.

Le cadre géochimique ayant été défini, nous pouvons étudier la répartition de l'uranium dans l'ensemble des échantillons.

Nous dosons l'uranium total et l'uranium soluble tel que nous l'avons défini au premier chapitre. Les résultats se résument comme pour les autres éléments.

Répartition globale.

	<u>U total</u>	<u>U soluble</u> (conventionnel)
-valeur la plus fréquente	$\gamma = 5,1 \text{ ppm}$	2,9 ppm
-indice de dispersion	$\sigma = 0,22$	0,3
-abondance	$m = 6 \text{ ppm}$	4 ppm

Le graphique de la droite de Henry montre que les ajustements lognormaux sont corrects. (fig. 3)

Ces chiffres appellent, pour le moment, peu de commentaires.

(1) voir justification dans l'annexe I.

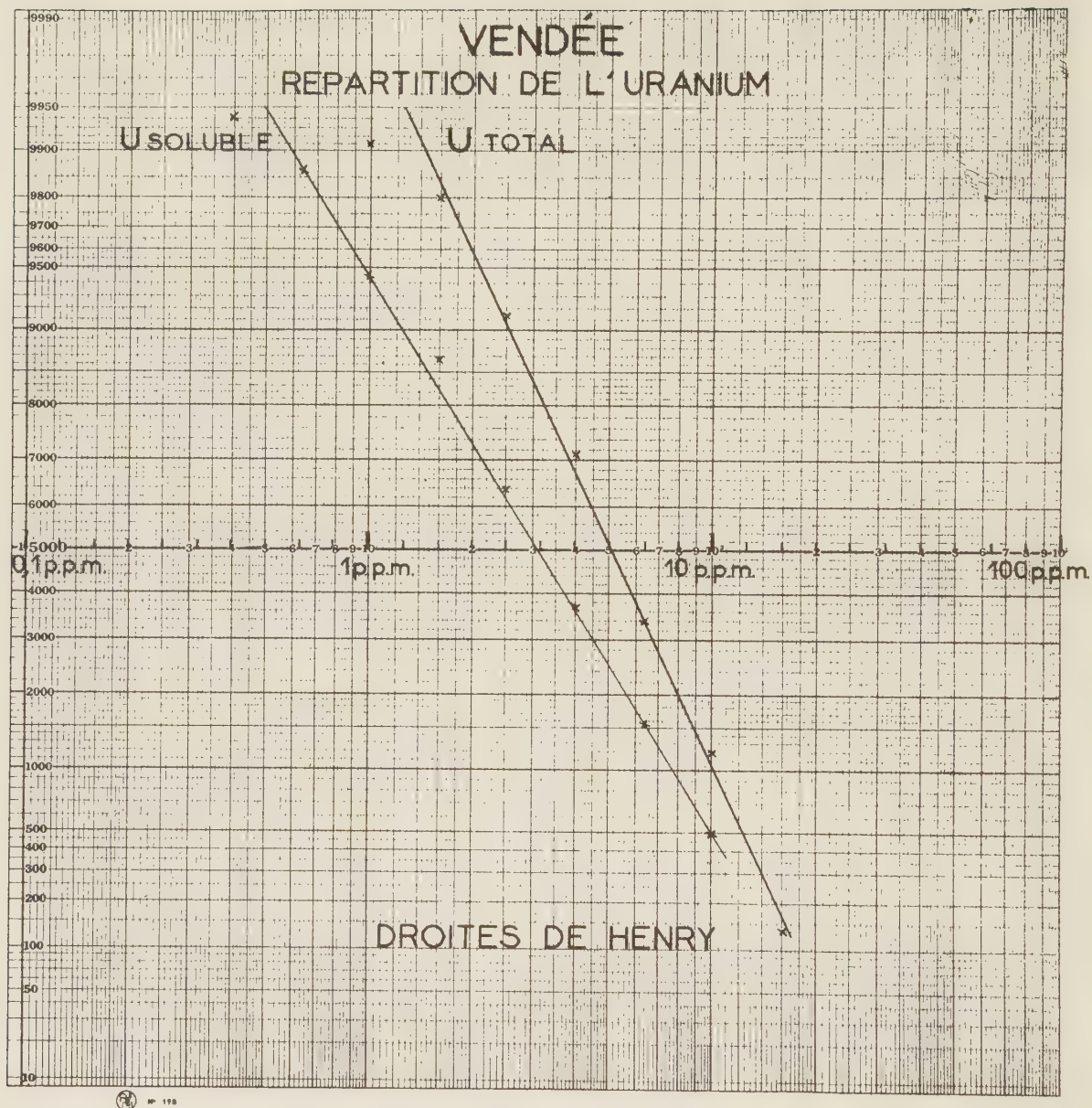


Figure 3 - Vendée
Répartition de l'uranium.

Taux d'uranium soluble

Nous appelons taux d'uranium soluble pour cent :

$$t = \frac{U \text{ soluble}}{U \text{ total}} \times 100.$$

La loi de répartition des taux d'uranium soluble dans l'ensemble des échantillons s'obtient facilement :

U total et U soluble sont des variables lognormales.

$\log (U \text{ total})$ suit une loi normale de médiane γ_1 , d'écart-type σ_1 .

$\log (U \text{ soluble})$ suit une loi normale de médiane γ_2 , d'écart-type σ_2 .

$$\log \frac{U \text{ soluble}}{U \text{ total}} = \log (U \text{ soluble}) - \log (U \text{ total}).$$

La différence de deux variables normales suit aussi une loi normale.

$\frac{U \text{ soluble}}{U \text{ total}}$ est donc une variable lognormale.

Calculons ses paramètres :

$$\log \gamma_t = \log \gamma_2 - \log \gamma_1 = \bar{1},760.$$

$$\% \gamma_t = 57$$

$$m = 66 \text{ pour cent.}$$

Mais U soluble n'est pas indépendant de U total. Le coefficient de corrélation calculé par l'ellipse de corrélation donne : $r = 0,93$.

$$\text{Donc : } \sigma^2 (\log \gamma_2 - \log \gamma_1) = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2r \sigma_1 \sigma_2. \text{ D'où } \sigma = 0,140.$$

La notion de taux d'uranium soluble étudié dans l'ensemble du massif est ainsi défini. C'est en effet un indice fluctuant mais bien centré sur une valeur particulière.

Répartition géographique.

Reprenons la répartition de l'uranium dans les différentes parties du massif, en étudiant la distribution de l'uranium total et soluble dans les panneaux définis précédemment.

Le tableau des indices de dispersion se résume ainsi :

	VENDEE	général	I	II	III	IV
U total	γ (ppm)	5,1	6,9	5,4	4,7	4,3
	m (ppm)	6	8	5,6	5,5	5
	σ	0,22	0,23	0,180	0,26	0,29
U soluble	γ (ppm)	2,9	4	3,1	3,4	2,6
	m (ppm)	4	5	3,7	3,8	3,6
	σ	0,3	0,29	0,29	0,23	0,29

On voit que le panneau I se détache fortement par des teneurs nettement plus élevées.

Les panneaux II et III ne sont pas significativement différents.

Le panneau IV est légèrement plus faible et son indice de dispersion est par contre plus élevé. Ceci signifie que ce panneau est "pollué" par quelques échantillons étrangers.

Le taux d'uranium soluble ne varie pas d'une façon appréciable dans les divers panneaux.

On peut, en première interprétation, dire que l'abondance de l'uranium dans les panneaux I, II, III, à roches plus potassiques et moins sodiques, est plus élevée que l'abondance de l'uranium dans le panneau IV.

Par contre, dans les panneaux I, II, III, parfaitement homogènes sur le plan pétrochimique, existent de fortes variations géographiques de l'uranium présent.

I - CADRE GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE (carte n° 2).

La zone étudiée s'étend, d'Est en Ouest, de Pontivy à Quimper, et du Nord au Sud, de Rostrenen à Quistinic, soit environ 1 500 km².

Les grandes lignes géologiques sont les suivantes [32]. Du Nord au Sud, on distingue :

1) le granite de Rostrenen, à contour nettement circonscrit sur la bordure Nord, et le granite à grain fin de Plélauff.

2) le granite à deux micas de Pontivy, subdivisé en trois massifs par deux bandes de sédimentaire, et dont la traînée Sud s'allonge jusqu'à Locronan dans le Finistère.

II - CADRE GÉOCHIMIQUE.

Ce cadre géochimique sera défini comme dans l'étude précédente.

Nous avons englobé, à côté du (ou des) granite à deux micas qui nous intéresse au premier chef, les deux granites de Plélauff et de Rostrenen, afin de voir comment évoluent nos distributions, et de vérifier si ces appellations qui sont, cette fois-ci, fortement appuyées par des raisons pétrographiques et géologiques, se confirment sur le plan géochimique.

255 prélèvements ont donc été effectués.

Une étude préliminaire des caractères majeurs a été conduite sur un échantillonnage réduit de 59 prélèvements pris au hasard, sur lesquels 15 analyses classiques et 44 analyses rapides ont été faites.

Les résultats sont donnés dans les tableaux d'analyses IIa et IIb.

L'étude sommaire de la distribution de K₂O, Na₂O, CaO, MgO, Al₂O₃, montre un groupement des teneurs autour de valeurs moyennes à l'exception de 6 roches qui sortent d'une manière flagrante des distributions ainsi ébauchées.

Les échantillons 216 et 23 se sont révélés, à l'examen pétrographique, être des échantillons prélevés en bordure de massif ou à côté de bande de schistes ; ce sont des échantillons de contact qui ont été inclus accidentellement.

Les échantillons 86, 166, 106, 164, qui présentent chacun une anomalie sur l'un ou l'autre des composants majeurs, appartiennent tous à la zone de prélèvements faits dans les granites de Rostrenen et Plélauff. On peut donc déjà avancer que ces échantillons ne rentrent pas dans notre définition de population homogène. Par contre, certains autres échantillons du même secteur ne peuvent être rejetés à priori, et une séparation plus poussée des populations devra être tentée.

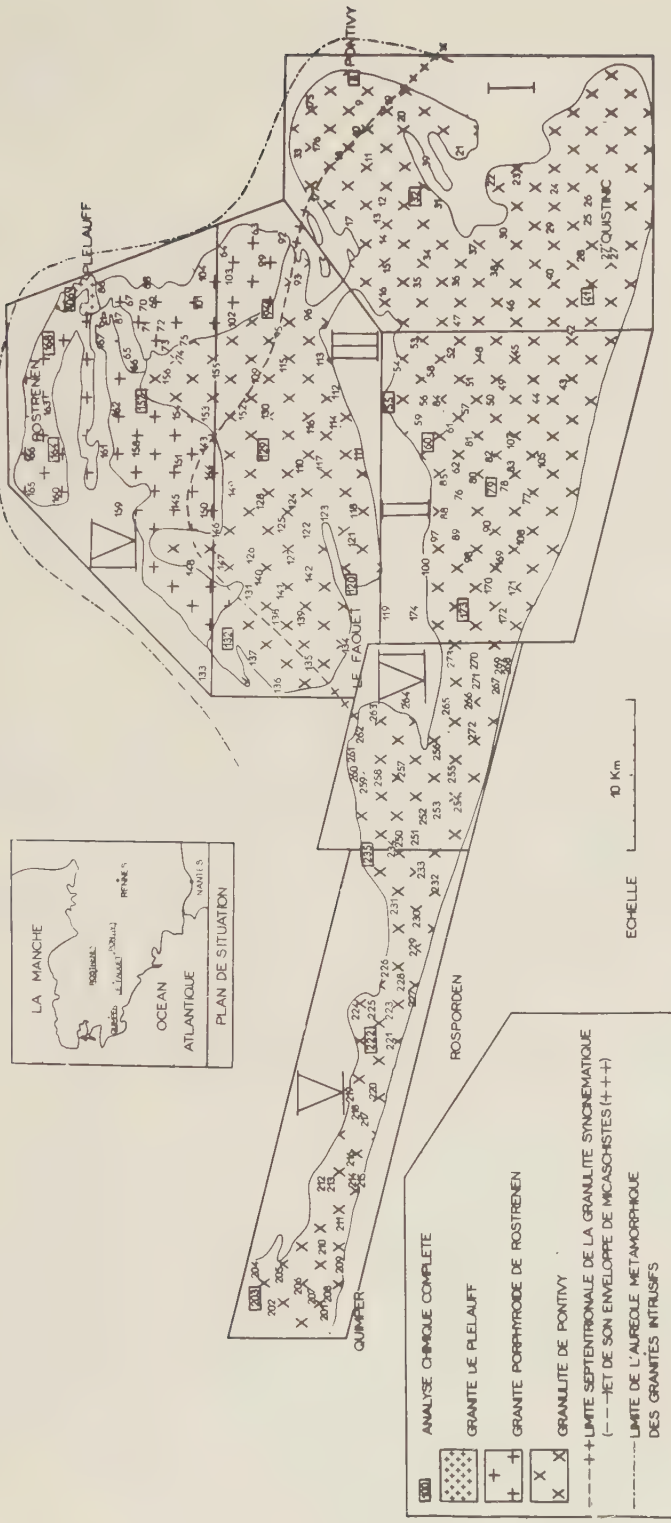
Nous éliminons donc les échantillons aberrants et faisons l'étude détaillée des distributions. Les résultats obtenus sont résumés au tableau provisoire suivant :

Constituants	γ en pourcentage	m en pourcentage	σ
SiO ₂	71,5	71,5	0,01-
Al ₂ O ₃	14,7	14,9	0,04
K ₂ O	4,5	4,6	0,06
Na ₂ O	3	3,1	0,08
FeO	1,4	1,6	0,22
Fe ₂ O ₃	0,9	1	0,24
CaO	0,6	0,7	0,22
MgO	0,3	0,4	0,24

où γ est la valeur la plus fréquente ;

m est l'abondance ;

σ la dispersion géochimique.



Carte II - Bretagne
Massif de Pontivy.

Répartition géographique.

Découpons donc la zone étudiée en panneaux contenant 30 à 40 prélèvements, et suivons le comportement de K_2O , Na_2O et CaO dans ces panneaux. Les résultats sont donnés au tableau suivant :

Panneaux	K_2O			Na_2O			CaO
	γ en pourcentage.	m en pourcentage.	σ	γ en pourcentage.	m en pourcentage.	σ	m en pourcentage.
I	4,6	4,7	0,05	3,15	3,2	0,07	1
II	4,8	4,9	0,05	2,9	2,94	0,06	0,7
III	4,6	4,8	0,06	3,15	3,20	0,08	0,9
IV	4,4	4,5	0,08	3,2	3,3	0,06	2,2
V + VI	4,5	4,6	0,07	2,8	2,9	0,08	0,5

On peut voir que le panneau VI, contenant les granites de Rostrenen et Plélauff, s'exclut de l'ensemble par une quantité anormale de CaO .

L'indice de dispersion de K_2O est relativement élevé (0,08), ce qui traduit des mélanges à l'intérieur du panneau.

La teneur de K_2O est sensiblement plus faible.

L'ensemble des données statistiques ne suggère pas un passage progressif d'un terme à un autre d'une même population mais l'introduction d'une population étrangère.

Au contraire, l'ensemble des autres panneaux (I + II + III + V + VI) forme une population extrêmement cohérente, ne présentant pas de différences significatives d'un secteur à l'autre. On peut cependant remarquer une légère accentuation potassique dans le panneau II. Les panneaux V et VI sont légèrement perturbés par un échantillonnage difficile dû à l'étroitesse de la bande granitique et à son caractère devenant syntectonique sur la bordure Sud.

La subdivision en trois massifs du granite à deux micas par les bandes de sédimentaire n'est qu'apparente. La continuité et l'homogénéité pétrochimique du granite ne peut faire de doute.

Les caractéristiques géochimiques de ce granite sont les suivantes :

Constituants	γ en pourcentage	m en pourcentage	σ
SiO_2	71,4	71,45	0,01
Al_2O_3	14,6	14,65	0,04
K_2O	4,6	4,8	0,06
Na_2O	3	3,1	0,08
FeO	0,9	1	0,18
Fe_2O_3	0,7	0,8	0,18
CaO	0,6	0,7	0,20
MgO	0,3	0,4	0,26

La représentation graphique par les droites de Henry est donnée par la figure 4.

III - DISTRIBUTION DE L'URANIUM.

Distributions globales

Etudions les distributions globales de l'uranium total et soluble, dans le granite à deux micas défini au paragraphe II (panneaux I + II + III + V + VI), et dans le panneau IV (granite de Rostrenen et de Plélauff).

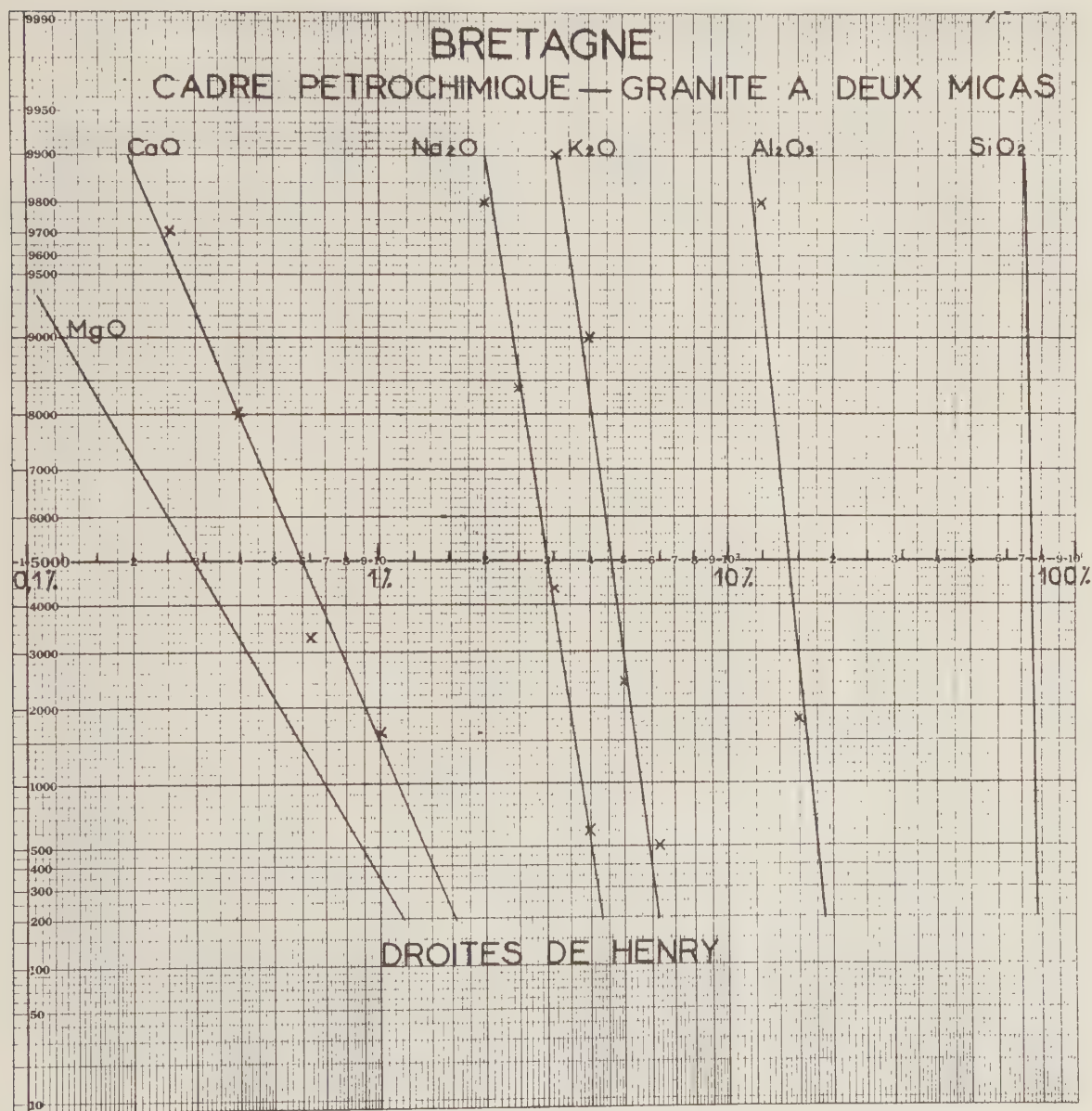


Figure 4 - Bretagne
Cadre pétrochimique. Granite à deux micas.

		Granite à 2 micas	Granites de Rostrenen et Plélauff
U total	γ ppm	4, 2	4
	m ppm	4, 6	4, 5
	σ	0, 22	0, 16
U soluble	γ ppm	3, 4	3, 1
	m ppm	3, 9	4
	σ	0, 24	0, 22

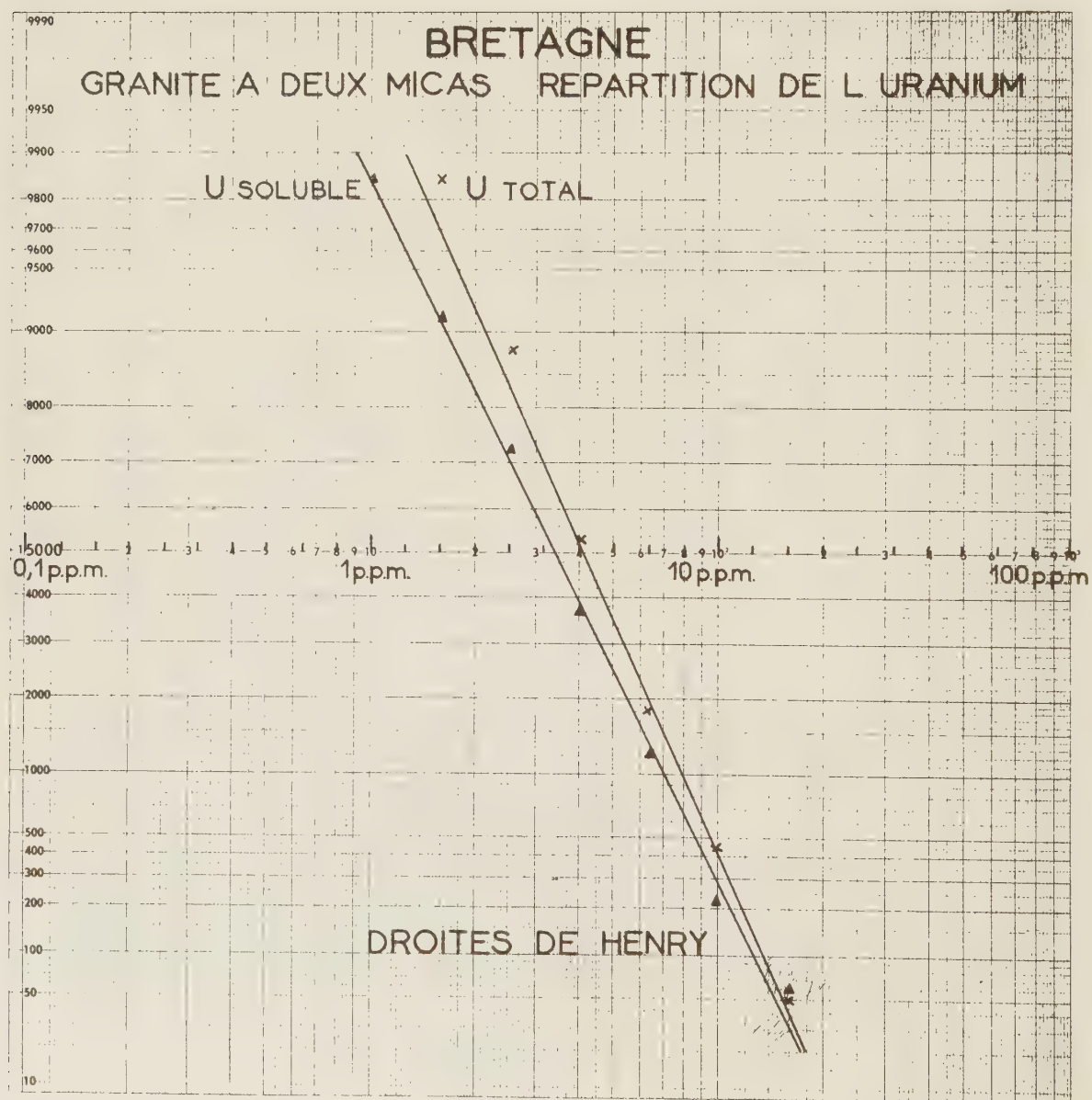


Figure 5 - Bretagne
Répartition de l'uranium. Granite à deux micas.

L'ajustement lognormal des distributions de l'uranium total et de l'uranium soluble dans le granite à deux micas est excellent (fig. 5).

On peut constater que la division des distributions entre granite à deux micas et granite de Rostrenen et Plélauff n'est appuyée que sur un critère pétrochimique, car ces distributions, en ce qui concerne l'uranium, ne sont pas significativement différentes.

L'indice de dispersion relativement élevé ($\sigma = 0,22$) du granite à deux micas nous incite à une étude géographique plus détaillée.

Distribution géographique

Suivons donc les distributions de l'uranium total et soluble du même granite dans les divers panneaux :

		I	II	III	VI	V	Général
U total	γ ppm	3,2	4,6	4,6	4,3	3,9	4,2
	m ppm	3,7	5	5,2	4,9	4,2	4,6
	σ	0,19	0,17	0,23	0,16	0,17	0,22
U soluble	γ ppm	2,8	4,2	3,7	3,1		3,4
	m ppm	3,2	4,5	4,6	3,9		4
	σ	0,23	0,19	0,28	0,25		0,24

Nous voyons qu'au sein d'une roche très homogène les abondances en uranium total et soluble sont extrêmement variables :

- l'abondance en U total est relativement faible dans le panneau I et la distribution bien homogène ;
- les panneaux II et VI ont une teneur en U total élevée et une dispersion faible ;
- le panneau III est à teneur élevée mais à dispersion également élevée ;
- le panneau V voit les teneurs redescendre.

Les teneurs anormalement fortes en uranium se situent donc dans les panneaux II, III, VI, et en fait dans le centre du massif granitique.

Les mêmes observations peuvent être faites sur l'uranium soluble.

Taux d'uranium soluble.

Ce taux, tel que nous l'avons déjà défini, fluctue suivant une loi lognormale ; sa valeur la plus fréquente est $\gamma = 81$ pour cent et sa valeur moyenne est $m = 88$ pour cent.

Ce taux remarquablement élevé signifie que 82 pour cent de l'uranium présent peut passer relativement facilement en solution.

Notons que la fluctuation de ce taux est légèrement amplifiée par l'addition des erreurs indépendantes sur U total et U soluble ; et comme ce taux n'est pas très éloigné de 100 pour cent, il est tout-à-fait normal de rencontrer un petit nombre de rapports : $\frac{U \text{ sol.}}{U \text{ tot.}} \times 100$ dépassant 100 pour cent.

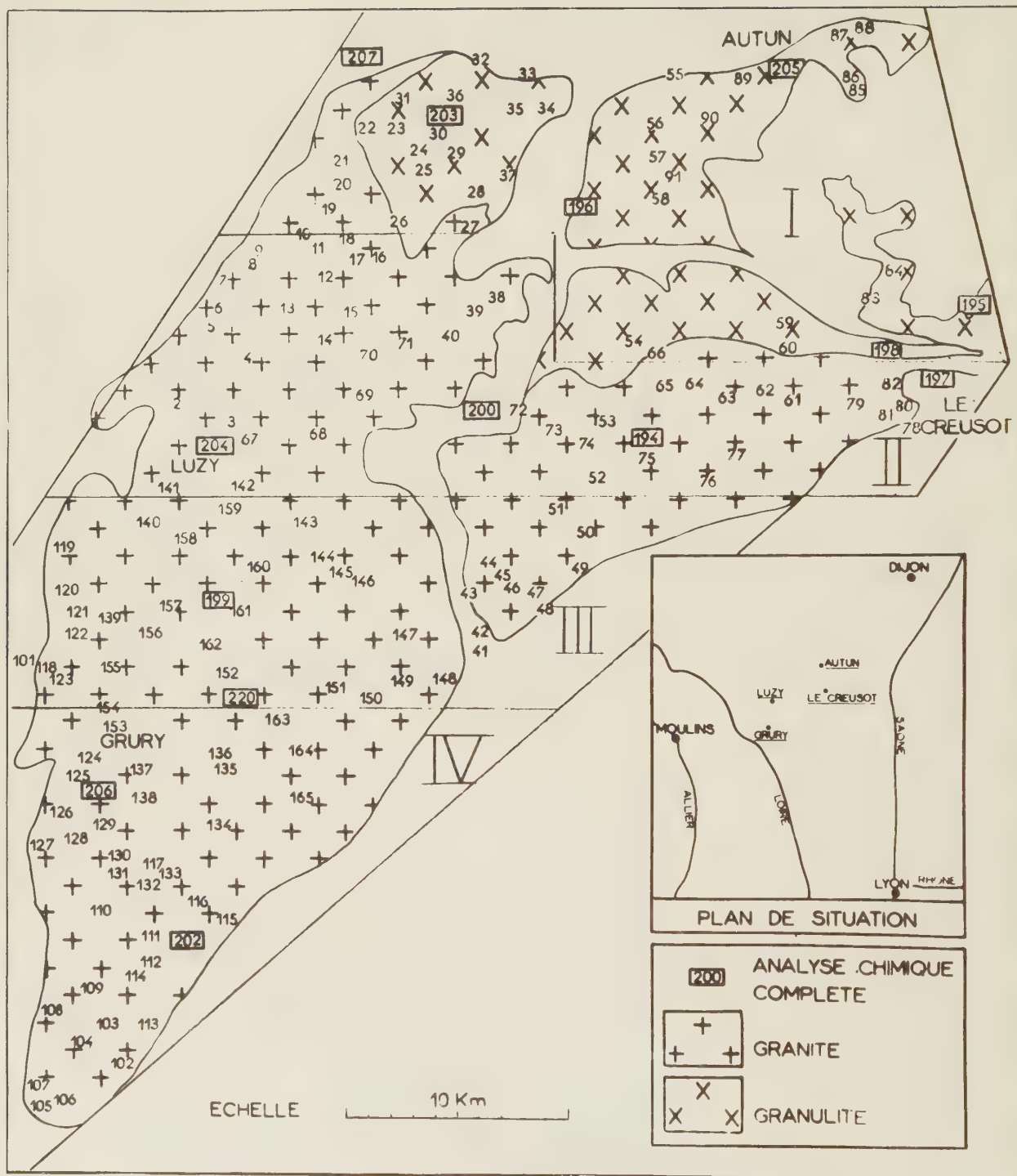
C - BATHOLITE DE LUZY (GRURY)

I - CADRE GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE. (carte n° 3)

La zone étudiée est située dans le Morvan [5].

Elle est constituée par un massif de granite porphyroïde à grands cristaux d'orthoses, de couleur assez variable, rose ou gris, et peu micacé.

Ce granite porphyroïde est remplacé progressivement vers le Nord du massif, vers Autun, par un granite à deux micas à grains plus fins.



Carte III - Morvan
Batholite de Luzy.

Le batholite est traversé par des filons de roches diverses, soit acides (microgranites), soit basiques (lamprophyres).

La zone couverte par nos prélèvements est d'environ 800 km².

II - CADRE GEOCHIMIQUE.

Environ 170 prélèvements ont été effectués, et, selon notre méthode habituelle, 10 analyses classiques et 41 analyses rapides ont été faites sur une première sous-population d'échantillons.

Les résultats des analyses sont donnés aux tableaux III a et III b. Trois échantillons (197, 220, 40) sont rejetés comme n'appartenant pas à la population granite : leur prélèvement dans les filons et leur analyse ont d'ailleurs été faits à la demande du géologue de secteur pour un problème particulier. On voit que, de toute manière, ils s'excluraient statistiquement car ils n'entrent pas raisonnablement dans une ébauche de distribution des caractères majeurs.

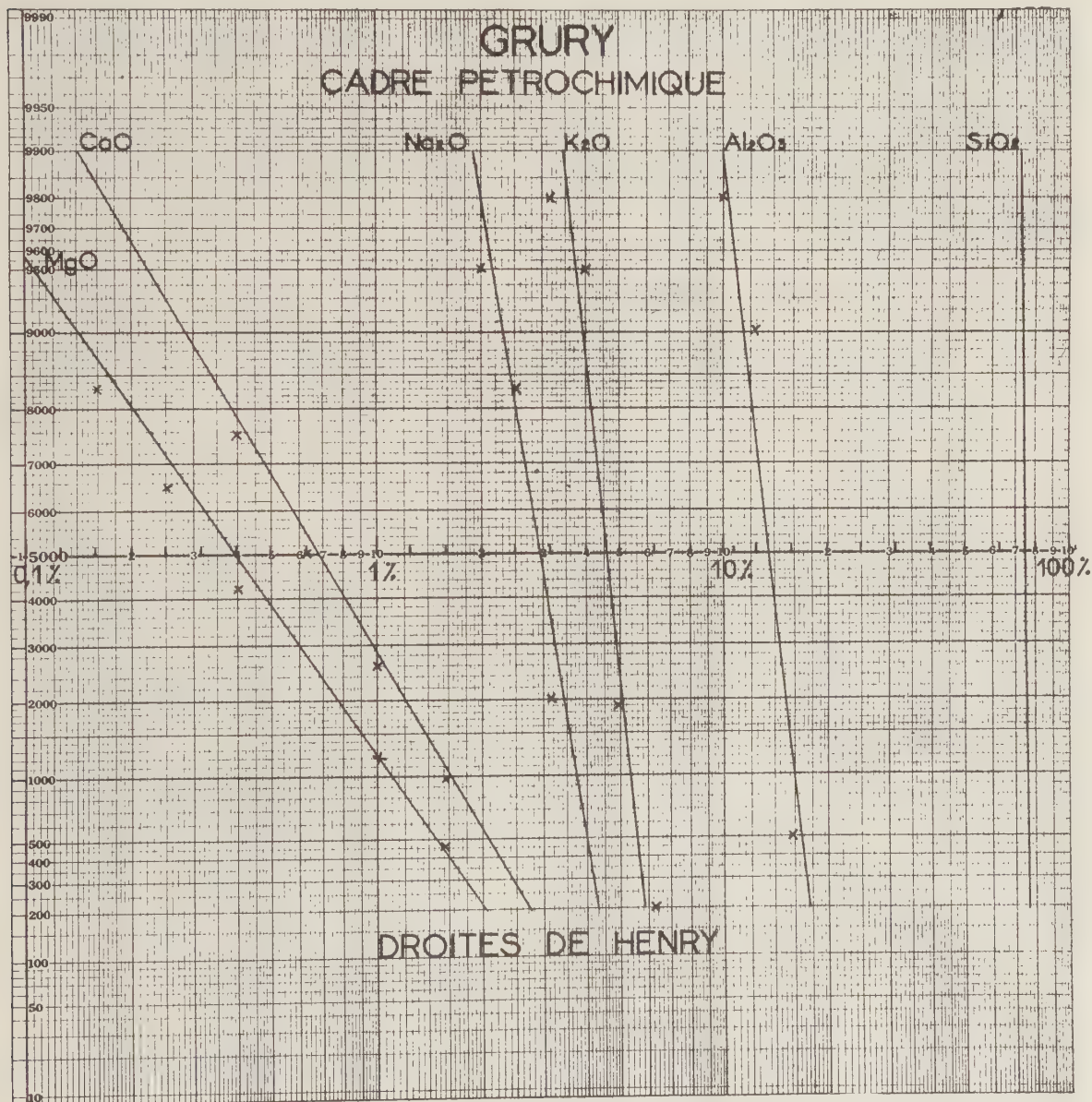


Figure 6 - Grury
Cadre pétrochimique.

Ces distributions sont décrites par le tableau suivant et résumées par les droites de Henry de la figure 6.

Elles ont des indices de dispersion (σ) du même ordre que ceux que nous avons déjà rencontrés en Bretagne et en Vendée pour SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O , Na_2O ; par contre, les distributions de FeO , CaO , Fe_2O_3 , MgO , sont assez fortement étalées.

Constituants	γ en pourcentage	m en pourcentage	σ
SiO_2	72, 2	72, 3	0, 01
Al_2O_3	13, 9	13, 9	0, 06
K_2O	4, 6	4, 7	0, 05
Na_2O	2, 9	3	0, 08
FeO	0, 9	1, 05	0, 25
CaO	0, 5	0, 8	0, 29
Fe_2O_3	1, 1		0, 33
MgO	0, 4	0, 7	0, 34

Répartitions géographiques.

Suivons donc le comportement de K_2O , Na_2O et CaO dans différents secteurs du massif.

Les résultats d'un découpage en quatre panneaux se résument ainsi :

Panneaux	K_2O			Na_2O			CaO
	γ en pourcentage.	m en pourcentage.	σ	γ en pourcentage.	m en pourcentage.	σ	m en pourcentage.
I	4, 7	4, 8	0, 06	2, 8	2, 9	0, 1	0, 7
II	4, 9	5	0, 08	2, 9	3	0, 1	0, 6
III	4, 4	4, 5	0, 06	2, 9	3	0, 09	0, 7
IV	4, 5	4, 6	0, 06	2, 8	2, 9	0, 09	1

On peut voir que le passage du granite porphyroïde au granite à deux micas se fait avec peu de changement dans la composition chimique. Le Nord du massif où se situe le granite à deux micas est légèrement plus potassique et moins calcique.

Nous pouvons donc considérer que nous avons affaire à un même milieu géochimique, milieu un peu moins homogène que ce que nous avons déjà vu, mais dont les répartitions en éléments majeurs ne s'améliorent pas par un découpage géographique. Tout au plus, une tendance géochimique se dessine-t-elle du Nord au Sud.

III - DISTRIBUTION DE L'URANIUM.

Distributions globales

La distribution de l'uranium total et soluble dans le batholite de Luz y est la suivante :

	γ ppm	m ppm	σ
U total	3, 7	4, 2	0, 22
U soluble	2, 3	2, 9	0, 27

Les droites de Henry sont dessinées à la figure 7.

L'ajustement lognormal est excellent.

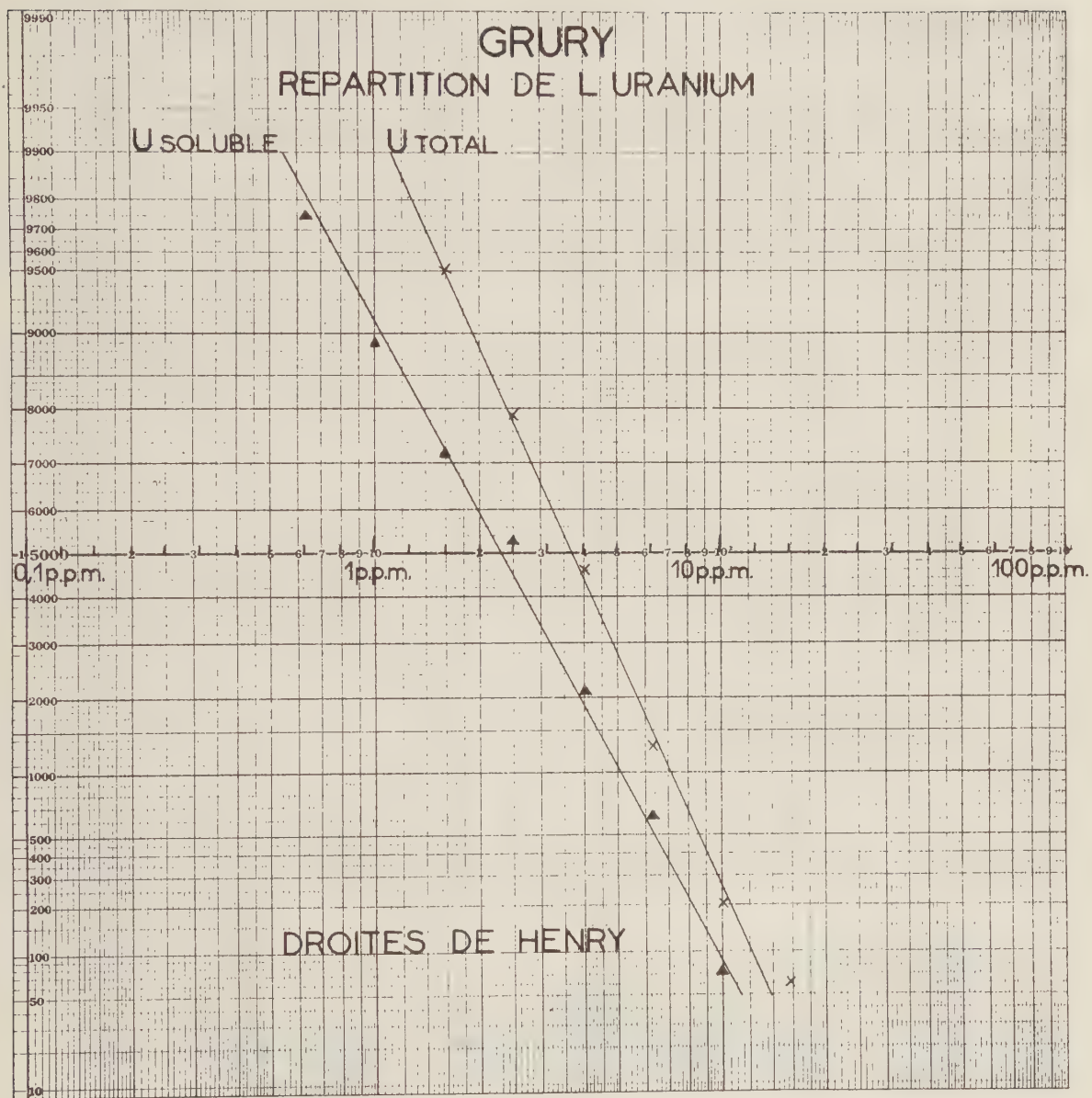


Figure 7 - Grury
Répartition de l'uranium.

Distributions géographiques

Les distributions de l'uranium dans les divers panneaux se résument ainsi :

		I	II	III	IV
U total	γ (ppm)	3,6	3,7	3,9	3,8
	m (ppm)	4,6	3,9	4,3	4,1
	σ	0,28	0,20	0,22	0,17
U soluble	γ (ppm)	2,3	2,3	2,5	2,4
	m (ppm)	3,2	2,8	3	2,9
	σ	0,32	0,27	0,33	0,24

Le panneau I englobant le granite à deux micas a une teneur en uranium légèrement plus élevée que les autres panneaux à faciès porphyroïde. Les indices de dispersion sont aussi nettement plus élevés, tant pour l'uranium total que pour l'uranium soluble.

Taux d'uranium soluble.

Le taux d'uranium soluble du massif suit une loi lognormale, centrée sur une médiane égale à 62 pour cent et dont la valeur moyenne est 68 pour cent.

D - BATHOLITE D'ELBEMA (HOGGAR).

I - CADRE GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE (carte n° 4).

Le batholite granitique d'Elbema est situé dans le Hoggar. Il a une forme elliptique de 10 km sur 8. Il est nettement intrusif dans les terrains encaissants, avec bordures nettes.

De nombreux autres massifs du même type existent dans le Hoggar et le granite est baptisé par les géologues : granite Taourit.

Macroscopiquement, on peut distinguer une structure concentrique dont la bordure est formée d'un granite à faciès grenu et le centre d'un granite porphyroïde à grains moyens.

Ce type de batholite se caractérise par une très forte radioactivité aux appareils de prospection γ , radioactivité particulièrement intense dans la zone de bordure.

II - CADRE GEOCHIMIQUE.

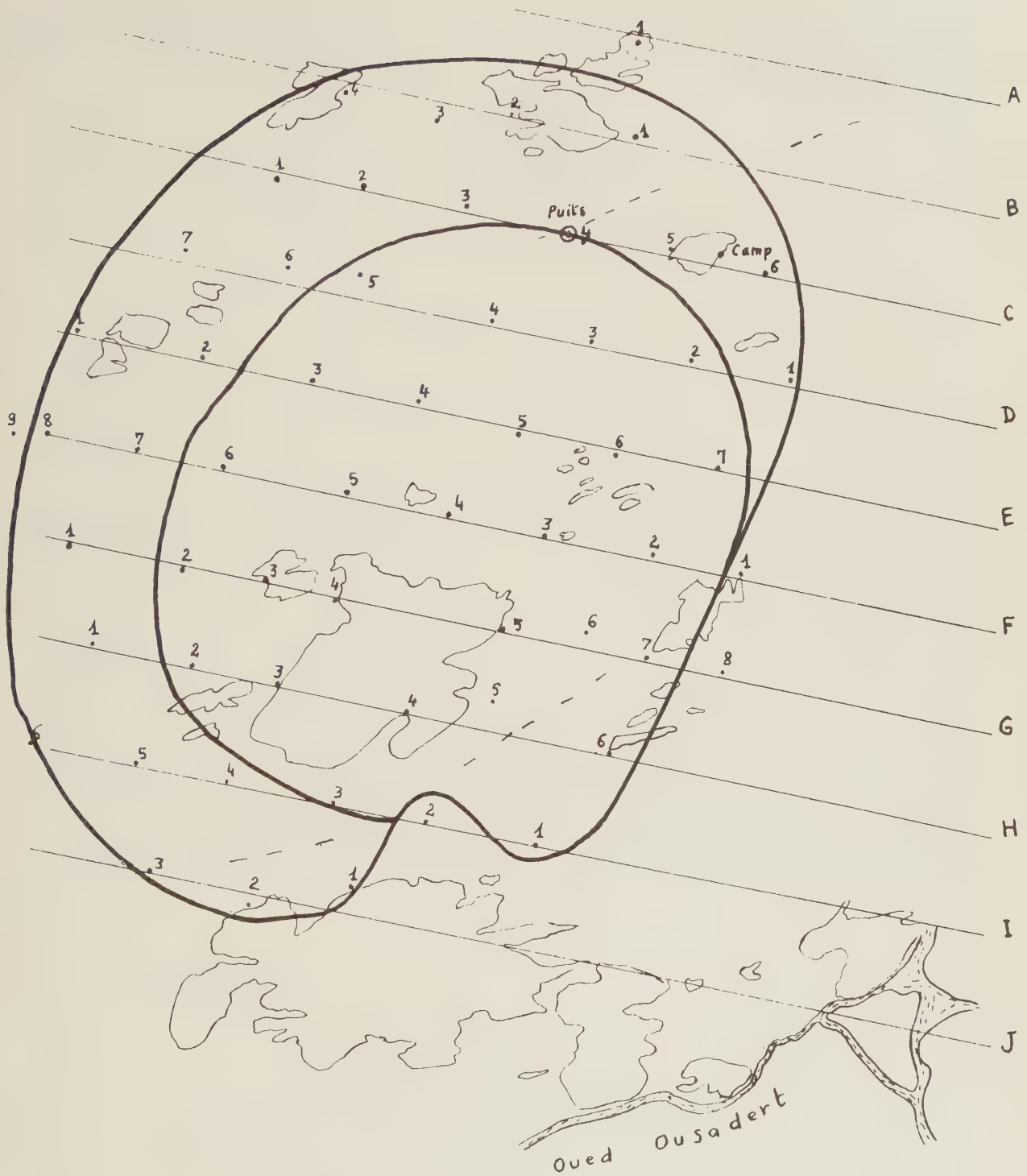
Le cadre pétrochimique a été déterminé par 10 analyses de roches et 60 analyses de K_2O , Na_2O .

Nous ne donnerons la dispersion que pour K_2O et Na_2O , nous contentant des moyennes pour les autres éléments dont le nombre d'analyses est un peu trop faible pour une étude de dispersion (tableaux IV a et IV b).

Nous retirons des distributions les échantillons A I, F I, F 9, G 8, I 2, qui ont été prélevés en bordure du massif mais hors de celui-ci.

Constituants	m en pourcentage	σ
SiO_2	72,9	0,07 0,05
Al_2O_3	14	
K_2O	4,6	
Na_2O	3,4	
CaO	1,1	
MgO	0,3	
FeO	1,4	
Fe_2O_3	0,9	

BATHOLITE GRANITIQUE D'ELBEMA



ECHELLE : 1/50 000

Carte IV - Hoggar
Batholite d'Elbéma.

L'examen des indices de dispersion de K_2O et Na_2O suffit à montrer que cette distribution est homogène.

Répartitions géographiques.

Nous n'adopterons pas ici un découpage par panneaux mais une séparation en 2 zones concentriques adaptées au problème géologique : le passage du type porphyroïde au type grenu se fait-il avec un changement de composition chimique ?

L'examen des distributions et des moyennes donne :

Constituants	Granite porphyroïde		Granite grenu	
	m en pourcentage.	σ	m en pourcentage.	σ
SiO_2	72		73,6	
Al_2O_3	14,4		13,6	
K_2O	4,5	0,06	4,7	0,07
Na_2O	3,3	0,06	3,4	0,04
CaO	1,2		0,9	
MgO	0,3		0,2	
FeO	1,4		1,4	
Fe_2O_3	1,1		0,7	

L'interprétation découlant de ces résultats est que les deux faciès, porphyroïde et grenu, appartiennent à un même milieu géochimique (même distribution de l'ensemble) mais que le changement est accompagné d'une différenciation chimique assez nette : le granite grenu est plus riche en $SiO_2 + K_2O$ et plus pauvre en $CaO + MgO + Fe_2O_3$.

III - DISTRIBUTION DE L'URANIUM.

Distribution globale (fig. 8)

	γ p ppm	m ppm	σ
U total	6,6	7,7	0,15
U soluble	3,8	4,5	0,2
U soluble en pourcentage		59 pour cent	

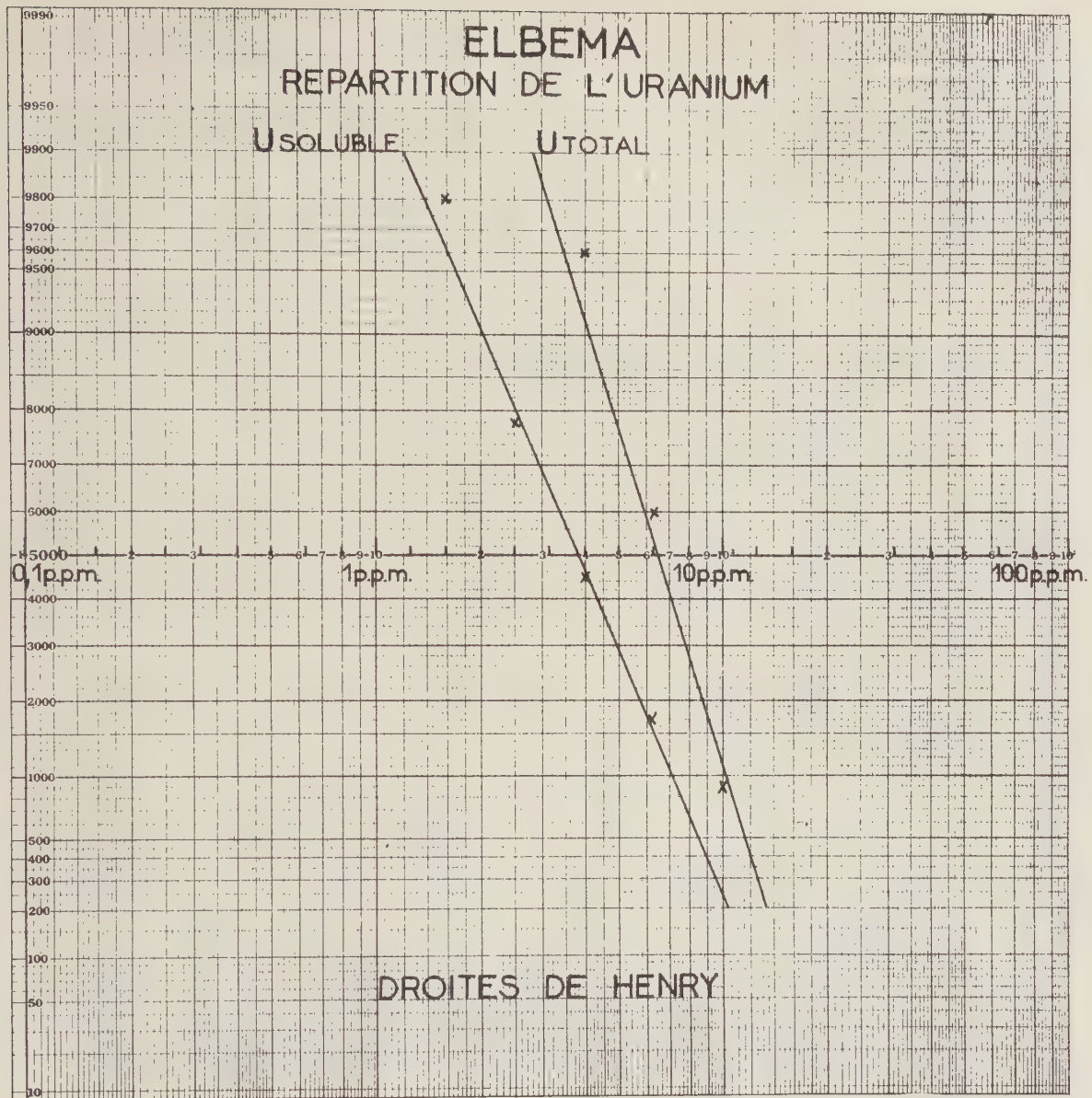


Figure 8 - Elbéma
Répartition de l'uranium.

Distribution géographique (fig. 9)

	Granite porphyroïde			Granite grenu		
	γ ppm	m ppm	σ	γ ppm	m ppm	σ
U total	5,6	6,4	0,14	7,7	8,8	0,13
U soluble	3,2	3,5	0,17	4,7	5,5	0,2
U soluble en pourcentage		55			60	

Le massif dans son ensemble a une teneur en uranium élevée. Les distributions de l'uranium soluble et de l'uranium total sont peu dispersées.

Le granite grenu est plus riche que le granite porphyroïde ; mais le fait que les distributions, homogènes et peu dispersées par granite, restent homogènes et peu dispersées sur la somme des deux granites, implique une corrélation statistique et géochimique de l'ensemble du massif, et appuie l'hypothèse de différenciation d'un même système géochimique.

Au contraire, les échantillons pris en bordure mais en dehors du massif tranchent brutalement par une faible teneur en uranium (U total = 2 ppm ; U soluble = 0,8 ppm).

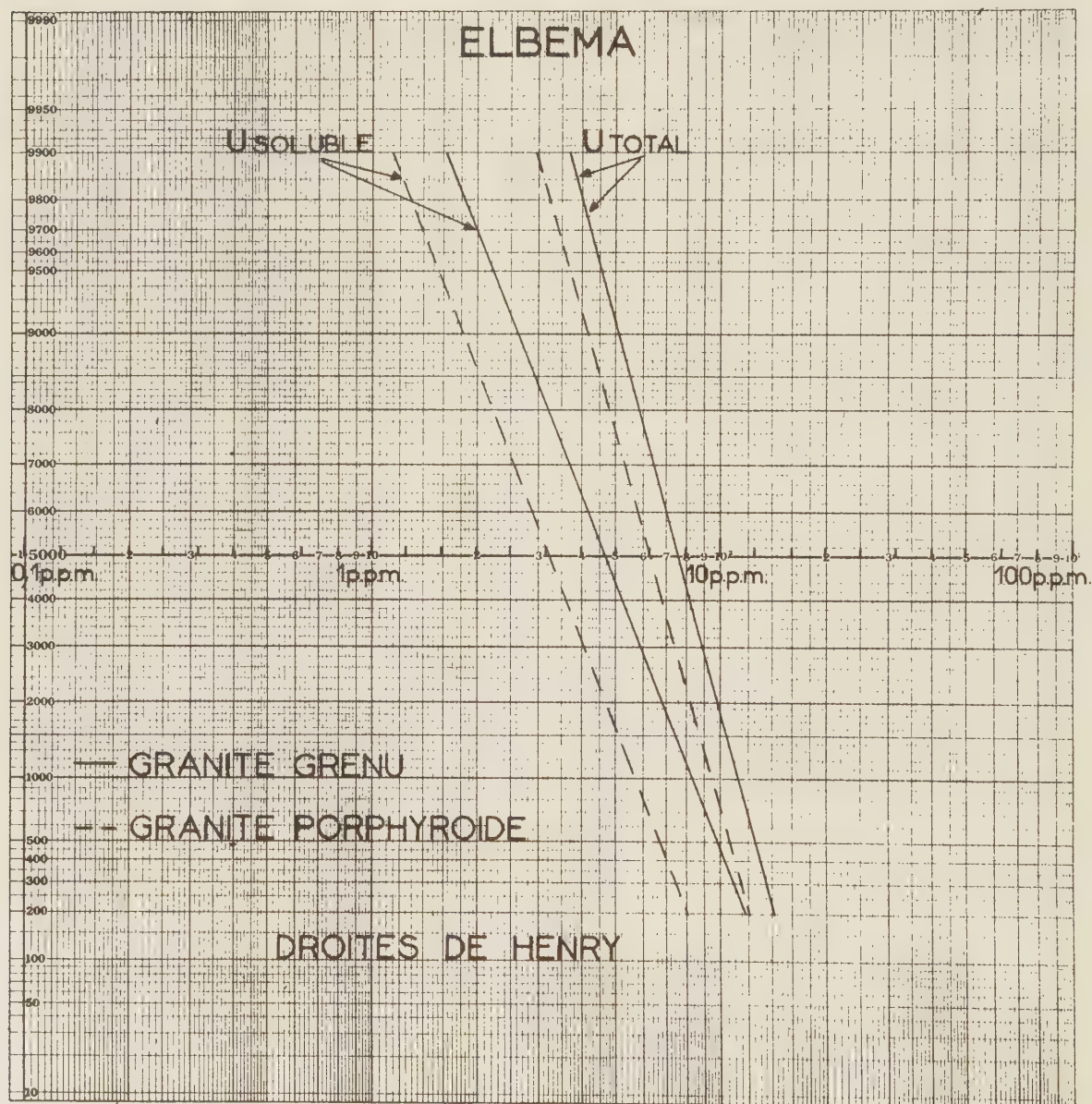


Figure 9 - Elbéma
Répartitions de l'uranium dans le granite grenu et le granite porphyroïde.

CHAPITRE III

LES INTERPRÉTATIONS GÉOCHIMIQUES

Dans toute publication de géochimie, on doit pouvoir séparer clairement d'une part l'apport expérimental de l'auteur et d'autre part l'apport d'hypothèses interprétatives.

Il faut que cet apport expérimental soit utilisable par les lecteurs pour leurs problèmes particuliers, selon leurs conceptions propres.

Nous avons donc, dans les deux premiers chapitres, exposé des méthodes, et leur emploi, d'une manière aussi objective et impersonnelle que possible.

Mais l'accumulation de faits quantitatifs a pour but d'amener un changement qualitatif dans nos connaissances. Les statistiques peuvent faciliter ce saut du quantitatif au qualitatif ; elles ne sauraient supprimer le caractère subjectif de l'interprétation.

Avant d'entrer dans les interprétations proprement dites, nous voudrions régler deux problèmes secondaires sur lesquels nous n'aurons plus ainsi à revenir.

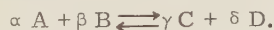
Loi lognormale.

Nous venons de voir que toutes nos distributions s'ajustaient correctement à une loi de référence lognormale. Il s'agit d'expliquer ce fait et de le situer à sa juste valeur, afin de ne pas attribuer à cette loi une croyance mystique.

Les distributions ont en général une forme en cloche dissymétrique, plus ou moins étirée vers les grandes valeurs de x , principalement pour les éléments en traces. La dissymétrie élimine une répartition purement gaussienne. (voir annexe II).

On pourrait hésiter à ajuster à une loi de Poisson, qui est également en cloche dissymétrique. Mais le grand avantage de la loi lognormale est sa souplesse et sa facilité d'utilisation. Cette souplesse est liée à l'existence de 2 paramètres indépendants (γ et σ). La facilité d'utilisation vient de l'existence de papiers graphiques gaussiens, commercialisés, et de tables de calcul données dans tous les ouvrages de statistique. Il y a donc une première raison pratique à l'emploi de la courbe lognormale.

On peut également trouver des raisons théoriques dans la généralité de cet emploi [39]. La genèse d'un massif granitique ou d'une minéralisation s'explique par une série d'équilibres chimiques :



Cet équilibre est régi par la loi d'action de masse :

$$[A]^{\alpha} [B]^{\beta} = K [C]^{\gamma} [D]^{\delta}$$

$$\alpha \frac{d[A]}{[A]} + \beta \frac{d[B]}{[B]} - \gamma \frac{d[C]}{[C]} - \delta \frac{d[D]}{[D]} = 0.$$

L'élément différentiel significatif est donc : $\frac{d[A]}{[A]} \dots$

Toute variation sur une des concentrations entraîne une sur toutes les autres concentrations.

Une pétrogénèse ou une métallogénie sont des phénomènes organisés. Or la loi lognormale représente l'addition de phénomènes aléatoires structurellement liés.

Au contraire, si l'on fait par exemple des dosages répétés sur un échantillon broyé et mélangé, la

structure est détruite et toute particule est indépendante de l'autre. La loi de référence devient une loi purement normale, gaussienne.

Les exemples que nous avons donnés, ainsi que l'expérience des gisements d'uranium [37] montrent que la loi reste lognormale lorsque nous étendons les zones de prélèvements et tant que nous avons affaire à une même population géochimique.

Cette permanence expérimentale de la lognormalité n'est pas aussi évidente qu'elle le paraît.

La moyenne de deux variances normales indépendantes est une variable normale. Mais si $\log x_1$ est une variable normale et $\log x_2$ aussi, $\log (x_1 + x_2)$ n'est pas égal à $\log x_1 + \log x_2$ et n'a pas de raison d'être une variable lognormale (on peut démontrer le contraire).

Or l'expérience montre que la loi reste lognormale ; ceci démontre que les valeurs x_1 et x_2 ne sont pas indépendantes, et implique une continuité dans le milieu géochimique.

La loi lognormale est donc non seulement un outil de représentation commode mais également un outil de recherche des homogénéités de milieux géochimiques, puisqu'il nous permet de faire une distinction entre un phénomène orienté continu tel qu'une différenciation au sein d'un même système, et un phénomène étranger tel que l'intrusion nette d'un autre milieu géochimique.

L'expérience montre également que la loi lognormale permet, dans l'évaluation des gisements métalliques, une bien meilleure estimation des teneurs exploitables.

Ainsi, la loi lognormale, étudiée et utilisée depuis plusieurs années par les statisticiens des mines [33] et reprise pour la géochimie par Ahrens, n'est ni un dogme, ni une propriété rigoureusement démontrée. C'est cependant une loi qui rend bien compte des phénomènes géologiques et qui repose sur des arguments théoriques sérieux.

Radioactivité du granite.

L'attention des géologues a été attirée, il y a fort longtemps, par "la" radioactivité exceptionnelle des roches granitiques. Cette radioactivité provient :

- de l'uranium et ses descendants ;
- du thorium et ses descendants ;
- du potassium ^{40}K ;
- et pour mémoire de ^{87}Rb , ^{148}Sm et ^{171}Lu ,

soit environ 24 émetteurs α ; 22 émetteurs β ; et des photons γ d'énergies variées.

Quand on place un échantillon de granite devant un compteur α , β , γ , on enregistre une partie de cet ensemble de rayons, compte-tenu de l'efficacité de l'appareil utilisé et de ses réactions devant des rayonnements de natures et d'énergies différentes. Même en prenant le cas simple d'un scintillateur à sulfure de zinc, ayant un rendement de 100 pour cent pour les seuls rayons α , on voit mal sur quelle base théorique sérieuse pourrait s'établir le dosage d'un seul des radioéléments, même un chef de file tel que le thorium ou l'uranium. Prétendre, en particulier, dans un granite, fonder le dosage de l'uranium sur un seul comptage α global ne repose sur aucun argument sérieux. Un tel dosage impliquerait une série d'hypothèses gratuites.:

- équilibre séculaire de la famille uranium ;
- équilibre séculaire de la famille thorium ;
- rapport constant $\frac{\text{U}}{\text{Th}}$, ou Th négligeable devant U.

Même en admettant (sans l'ombre d'une preuve) un rapport constant, à l'origine de la mise en place, de U/Th, on sait que Th n'existe que sous la valence IV géochimiquement peu mobile, que U existe sous une valence IV également peu mobile, mais aussi sous une valence VI extrêmement mobile.

Les travaux récents, ainsi que nos analyses, montrent que 50 à 90 pour cent de l'uranium du granite sont sous forme mobile. Son comportement géochimique n'a donc rien de commun avec celui du thorium et qui plus est, l'uranium mobile risque de se séparer de ses propres descendants.

Donc, toutes les méthodes de dosage radiométriques indirectes, fondées sur des hypothèses d'équilibre ou de rapports constants, sont suspectes ou grossièrement erronées.

Un grand progrès se dessine avec les systèmes de discrimination de l'énergie des rayonnements permettant d'identifier un émetteur. Malheureusement, les spectromètres dont nous pourrions disposer au C.E.A. sont encore insuffisamment sensibles pour l'étude des faibles radioactivités.

Nous avons cependant poursuivi systématiquement l'étude des corrélations α/U , β/U , non seulement dans les granites, mais dans de nombreux échantillons de roches diverses.

Il est évident qu'il y a corrélation, au sens statistique (cf Chapitre I), entre l'uranium et les α ou les β . Mais cette corrélation traduisant le sens des équations complexes de désintégration, est en général éloignée d'une relation fonctionnelle permettant un dosage.

Dans des cas très limités (qui n'ont d'ailleurs pas été rencontrés dans le travail présenté), où les teneurs en uranium dépassent 50 ppm, l'effet uranium domine et une relation fonctionnelle s'établit mais sur une base strictement locale qui ne peut en aucun cas être généralisée à l'ensemble d'un gisement et encore moins d'un gisement à un autre.

Chaque radioélément doit donc être observé individuellement sous l'angle de ses propriétés radioactives (période, rayon émis), mais surtout de ses propriétés chimiques (position dans le tableau de Mendeleeff, rayon ionique, etc.). Un gaz rare comme le radon par exemple n'a pas le comportement chimique du radium qui est pourtant son parent radioactif.

Il faut ainsi avoir toujours présent à l'esprit l'antagonisme entre les propriétés chimiques, extrêmement variées, des radioéléments naturels, qui tendent à les disperser au cours des processus géologiques, et les liens radioactifs immuables qui tendent à reformer des filiations.

Voir le seul côté de la formation séculaire de l'équilibre radioactif dans le granite revient à considérer ce granite comme un milieu géochimiquement mort après sa formation et impénétrable aux actions extérieures.

I - GEOCHIMIE DES GRANITES ETUDIES.

Ainsi que nous l'avons déjà dit, nous considérons comme fondamentale l'étude préalable du milieu géochimique dans lequel on se propose d'examiner le comportement d'un élément en traces.

Il faut souligner que, dans ce travail, nous ne cherchons pas à donner une nouvelle méthode de calcul de paramètres pétrographiques, mais une conception plus rationnelle de l'échantillonnage et de l'homogénéité géochimique. A l'opposé des paramètres pétrographiques classiques qui souvent donnent l'impression d'accroître l'information par la multiplication et le groupage de dosages sur un petit nombre d'individus (ce qui n'augmente nullement la connaissance de la roche dans son gisement), nous substituons une information synthétique sur l'ensemble des roches constituant le massif.

Ainsi, d'une part, un échantillon particulier se situe immédiatement par rapport aux lois de distribution d'un ensemble dans lequel il peut entrer ou s'exclure, guidant par là même objectivement le géologue; d'autre part, l'examen des lois de distribution et de leur étalement permet, par des comparaisons entre massifs ou entre panneaux d'un même massif, de connaître le degré d'homogénéité des roches et, avec une certaine expérience, de distinguer entre une fluctuation normale due au hasard, et une fluctuation étalée, impliquant un phénomène de différenciation ou un mélange de roches différentes.

Nous avons mis l'accent, plus sur la recherche du milieu géochimique homogène que sur l'étude des différenciations pétrographiques. Pour des recherches dans ce domaine, nous sommes parfaitement partisan de l'emploi classique des nombres d'atomes et des associations paramétriques, afin de faire apparaître les équations minéralogiques, mais à condition d'avoir un échantillonnage suffisamment représentatif des familles pétrographiques, et aussi de voir dans les paramètres des valeurs aléatoires ayant un certain domaine de fluctuation autour des valeurs centrales.

Cette recherche des homogénéités préalables s'est presque toujours heurtée, dans le passé, à des difficultés techniques, telles que le prix et la lenteur des analyses chimiques de roches. Celles-ci ont parfois été tournées par l'emploi des analyses modales à la platine intégratrice. Cette technique, pour présenter un intérêt quantitatif, demande, d'une part un échantillonnage aussi nombreux que celui que nous avons fait, d'autre part, l'examen d'un nombre de plaques minces par échantillon, compatible avec la grosseur des grains de la roche. Si l'on compte que, pour les roches que nous avons, il aurait fallu 5 à 10 lames de 2 x 2 cm par échantillon, la préparation et l'examen fastidieux et délicat d'une telle quantité auraient représenté un effort disproportionné avec le caractère relativement imprécis des résultats obtenus. [6].

Comparons donc les massifs tels qu'ils ont été définis au cours des études régionales :

	Vendée		Bretagne granite à 2 micas		Grury		Elbéma	
	m (*)	σ	m (*)	σ	m (*)	σ	m (*)	σ
SiO ₂	71	0,01	71,5	0,01	72,3	0,01	72,9	
Al ₂ O ₃	15,2	0,05	14,7	0,04	13,9	0,06	14	
K ₂ O	4,7	0,06	4,8	0,06	4,7	0,05	4,6	0,07
Na ₂ O	3,1	0,07	3,1	0,08	3	0,08	3,4	0,05
CaO	0,9	0,16	0,7	0,20	0,8	0,29	1,1	
Fe ₂ O ₃	1,2	0,18	0,8	0,18	1,3	0,33	0,9	
FeO	1,1	0,18	1	0,18	1,1	0,25	1,4	
MgO	0,4	0,34	0,4	0,26	0,7	0,34	0,3	

(*) m en pourcentage.

L'observation peut porter simultanément sur les valeurs moyennes et les fluctuations autour de ces moyennes, donc à la fois sur la composition chimique et l'homogénéité de l'ensemble des massifs.

Valeurs moyennes.

Il n'est pas besoin de paramètres ni de calcul compliqué pour constater la similitude de composition de ces massifs. Cette similitude est même une identité de composition pour les alcalins.

Calculons les résultats en nombre d'atomes, en divisant le pourcentage en poids par la masse correspondant à un atome gramme.

Composition en nombre d'atomes.

	Vendée	Bretagne	Grury	Elbéma
Si	1 181	1 189	1 203	1 213
Al	298	289	273	275
K	100	102	100	98
Na	100	100	97	110
Ca	17	13	14	20
Mg	10	10	17	8
Fe ⁺⁺⁺	15	10	16	11
Fe ⁺⁺	15	14	15	20
Si + Al	1 479	1 478	1 476	1 488
K + Na	200	202	197	208
Fe ⁺⁺ + Fe ⁺⁺⁺	30	24	31	31
Al + Fe ⁺⁺⁺	313	299	299	286
Fe ⁺⁺ + Mg	25	24	32	28

La similitude des résultats est encore plus frappante.

Homogénéité.

On peut voir que le degré d'homogénéité, donné par la valeur de σ , varie avec les éléments dans chaque massif. Ceci traduit parfaitement les propriétés géochimiques de ces éléments qui forment l'architecture des minéraux principaux.

Si est la base du squelette cristallin des silicates. Il est présent sous la forme d'oxy-anion tétraédrique (SiO_4). On comprend que la fluctuation de la silice soit très faible dans un même milieu géochimique dont elle est pratiquement le support.

Al peut être à la fois sous forme d'oxy-anion tétraédrique où il remplace un atome Si, et sous forme de cation Al^{+++} . L'analyse chimique ne peut nous fixer sur le nombre respectif d'atomes sous une forme ou sous l'autre. On constate que l'indice σ est plus grand que celui de la silice mais reste cependant faible.

De l'autre côté, nous avons les cations Na^+ , Ca^{++} , K^+ , Mg^{++} , Fe^{++} , Fe^{+++} , (et Al^{3+}) pouvant entrer dans des combinaisons extrêmement diverses au sein d'un même squelette.

Ca et Mg sont, dans les granites examinés, des caractères relativement secondaires (< 1 pour cent), ce qui se traduit par des dispersions étalées mais qui se regrouperaient si on passait à une roche où les caractères calcique ou magnésien reprenaient de l'importance.

Fe^{++} et Fe^{+++} entrent à la fois dans des minéraux accessoires, des minéraux principaux et dans des inclusions ferrugineuses diffuses, donc dans une quantité de mécanismes, ce qui explique leur forte dispersion.

Au contraire, K^+ et Na^+ sont les plus intéressants à suivre car ils entrent dans les minéraux majeurs et caractéristiques des granites étudiés.

On peut constater que les divers massifs donnent des indices d'homogénéité, par élément, du même ordre ; ceci semble traduire, à côté de la similitude des valeurs moyennes, une similitude des phénomènes géochimiques qui ont conduit à la formation des roches.

Examinons de plus près le sens numérique de l'indice de dispersion σ (indice logarithmique).

Nous voyons que le plus faible indice que nous ayons trouvé, pour K_2O ou Na_2O par exemple, est $\sigma = 0,05$. Ceci signifie que 70 pour cent des échantillons d'une valeur moyenne en K_2O de 4,7 pour cent sont compris entre 4,2 et 5,2 pour cent. On n'a aucun motif de considérer un échantillon isolé, de teneur en K_2O , 4,2 pour cent, comme significativement différent d'un autre ayant une teneur de 5,2 pour cent. Plus, sur 100 échantillons, 30 s'écarteront encore davantage de la valeur centrale.

On peut voir à quelles conclusions erronées peut conduire l'emploi inconsidéré d'analyses et de paramètres sur un échantillonnage trop peu nombreux, même s'il est bien fait.

Au contraire, si l'on dispose d'échantillons suffisamment nombreux, on est statistiquement capable de prouver qu'une distribution centrée sur une moyenne est significativement ou non différente d'une autre distribution centrée sur une autre moyenne.

Ainsi en Vendée, un panneau ayant une teneur en K_2O de 4,3 pour cent se différencie statistiquement d'un autre panneau de teneur moyenne égale à 4,7 pour cent. (voir annexe I).

Homogénéité géographique.

Nous avons vu, au cours des études régionales, plusieurs cas :

- 1) Dispersion statistique homogène sur toute l'étendue du massif (Grury) et passage d'un granite à deux micas à un granite porphyroïde avec une variation géochimique extrêmement faible.
- 2) Dispersion statistique homogène sur la plus grande partie du massif (Bretagne), avec introduction locale de roches d'une autre famille (granite de Plelauff et Rostrenen).
- 3) Dispersion statistique homogène sur tout le massif avec différenciation géographique en deux sous-populations non indépendantes, dérivant d'une même population mère. Les échantillons plus potassiques et moins sodiques se concentrent dans une partie du massif, les échantillons complémentaires dans l'autre (cas de la Vendée), sans grand changement dans l'allure pétrographique macroscopique.
- 4) Changement de faciès pétrographique s'accompagnant (cas d'Elbéma) d'une différenciation chimique issue d'un même milieu géochimique.

En résumé, l'étude de l'homogénéité et la composition de 4 types de granites, très éloignés par leur situation géographique, par leur âge, leur position géologique et leur pétrographie, met en évidence leur similitude géochimique.

Notre but étant uniquement de situer ces granites sur le plan géochimique, nous livrons ces résultats aux géologues et pétrographes afin qu'ils les intègrent dans leurs observations microscopiques et géologiques, et nous passons à notre objectif principal qui est le comportement de l'uranium dans les milieux ainsi définis.

II - COMPORTEMENT GEOCHIMIQUE DE L'URANIUM

Urey [55] pense que l'uranium est l'élément le moins commun de la terre. Son abondance atomique serait de 0,0002 (silice 10 000).

C'est un élément lithophile, qui serait pratiquement concentré dans la croûte terrestre.

Son abondance dans la lithosphère varie avec les auteurs. Elle est de 1 ppm pour Tomkeef (1946), 2 ppm pour Fleischer, 3 pour Vinogradov, 4 d'après Fersman et Rankama. Le rapport sur les "Réserves naturelles d'uranium et de thorium" présenté par l'Organisation des Nations Unies à Genève en 1955 est plus prudent : "Les données sur l'accumulation de l'uranium à l'intérieur de la terre et leur migration vers les gisements de surface sont largement hypothétiques. Les données quantitatives sur les éléments que l'on trouve dans les roches ignées de la croûte terrestre sont incertaines et les estimations relatives à leur abondance varient" et en particulier, des variations de teneur en U dans les granites de 1 à 100 ppm sont signalées.

Ce préambule nous permet d'apprécier les valeurs trouvées dans la littérature et qui ont fréquemment servi de base à des théories générales sur la géochimie de l'uranium :

	<u>U ppm</u> (g/tonne)
<u>Météorites pierreuses</u>	
- PANETH (1948)	0,35
- DAVIS (1950)	1
<u>Roches ultrabasiques</u>	
- DAVIS	0,03
- VINOGRADOV (1950)	0,03
<u>Gabbros</u>	
- EVANS et GOODMAN (1941)	0,96 ± 0,11
- KEEVIL (1938)	0,94
- VINOGRADOV (1950)	0,3
<u>Roches intermédiaires</u>	
- EVANS et GOODMAN (1941)	1,4 ± 0,2
- SENFTLE et KEEVIL (1947)	2,27 à 3,03
- VINOGRADOV (1950)	1,8
<u>Granites</u>	
- EVANS et GOODMAN (1941)	3,0 ± 0,3
- KEEVIL (1938)	2,77
- SENFTLE et KEEVIL (1947)	3,84 à 4,02
- VINOGRADOV (1950)	3,5

Nous partageons entièrement l'opinion de E.S. Larsen Jr et G. Phair : "Du point de vue du géologue, le moindre échantillon prélevé dans une seule province structurale, une série magmatique ou une vaste intrusion, donne plus d'informations que la généralisation de résultats présentés dans des tableaux (tel que précédent)". [36].

Rappel de quelques propriétés géochimiques de l'uranium.

L'uranium est dans le même groupe de la classification de Mendeleeff que le chrome, le molybdène et le tungstène, mais il s'en sépare nettement dans ses propriétés géochimiques. L'uranium fait partie de la série des actinides correspondant à la série des lanthanides.

Le rayon ionique de $U^{4+} = 1,05 \text{ Å}$ est très voisin de celui de $Th^{4+} = 1,10 \text{ Å}$, $Zr^{4+} = 0,87 \text{ Å}$, mais aussi des terres rares : de $La^{3+} = 1,22 \text{ Å}$ à $Lu^{3+} = 0,99 \text{ Å}$, $Y^{3+} = 1,06 \text{ Å}$, et de $Ca^{2+} = 1,06 \text{ Å}$.

Ceci explique que U^{4+} est souvent disséminé dans les réseaux des minéraux de ces éléments, les remplaçant par substitution isomorphe.

L'uranium existe aussi sous la valence 6 :

$$U^{6+} = 0,79 \text{ Å},$$

mais l'ion U^{6+} n'existe pas à l'état libre. Il forme un complexe bivalent ; le cation uranyl $[UO]^{2+}$.

Comme le thorium, l'uranium est un élément extrêmement oxyphile. On ne le trouve jamais à l'état natif et il ne forme pas de sulfures, arsénures, tellurures, etc.

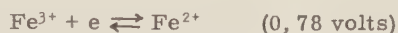
La valence 4, entrant dans des composés très peu solubles, est extrêmement peu mobile.

La valence 6, au contraire, donne des composés de l'ion uranyl extrêmement solubles et géochimiquement très mobiles.

L'oxydation de la valence 4 à la valence 6 est relativement facile. Le potentiel normal d'oxydo-réduction de :



est très inférieur à celui du couple :



Nous laisserons de côté les propriétés radioactives de l'uranium dont on sait l'importance géologique dans des problèmes tels que les âges, la chaleur des roches, l'état métamicté, etc. Mais sa période longue (4,5 milliards d'années), nous permet d'envisager l'étude des propriétés géochimiques comme celle d'un élément chimique ordinaire.

La Conférence de Genève en 1955 a été l'occasion d'une revue de nos connaissances sur la géologie des roches en ce qui concerne l'uranium.

Le travail que nous présentons permet de répondre à quelques uns des très nombreux points d'interrogation que posait Neuerburg [44] dans sa communication sur l'"Uranium dans les roches ignées des Etats-Unis d'Amérique". Elle répond également au souhait qu'exprimait encore plus récemment Gerasimovsky [21] sur l'orientation que devaient prendre les recherches dans ce domaine.

Nous avons abordé le problème du comportement géochimique de l'uranium dans le granite sous deux angles :

- abondance de l'uranium parmi les roches ignées ;
- forme de l'uranium dans les roches ignées.

Abondance de l'uranium parmi les roches ignées.

Après une critique sévère des anciennes méthodes d'analyse, Neuerburg constate : "Les teneurs en U des roches ignées varient dans de larges limites. Mais pour une part importante, les variations se trouvent systématiquement associées aux caractères chimique, pétrographique et structural des roches. Toutes les variations constatées (qui ne peuvent être attribuées à une erreur d'analyse) reflètent des processus géologiques qui ont affecté des volumes discrets de roches ignées de la croûte terrestre. La variation au sein d'un groupe de roches parentes n'est pas nécessairement la même que dans un autre groupe, même semblable au premier".

Les données bibliographiques constituent un "tout plutôt confus" où l'on a associé beaucoup d'hypothèses pour expliquer des variations dans des roches apparemment similaires.

Mais avant d'envisager des hypothèses, faudrait-il encore être sûr des faits, et être certain que l'on a comparé des choses comparables ; en particulier, il faudrait qu'on se soit assuré des similitudes ou des différences non seulement sur le plan des apparences pétrographiques, mais sur le plan de la géochimie des milieux étudiés.

Comparaison entre les divers massifs étudiés.

Ainsi que nous l'avons montré, les quatre massifs observés, après discrimination des éléments étrangers, sont extrêmement proches du point de vue de leur composition géochimique.

Or ces massifs n'ont pas été choisis totalement au hasard ; ce sont des massifs prospectés par le C.E.A. pour l'uranium. Cette prospection n'est pas décidée à l'aveuglette mais sur des critères théoriques et surtout expérimentaux. On prospecte systématiquement, en France métropolitaine, dans la zone hercynienne où la plupart des gisements importants ont été trouvés, les massifs circonscrits de granites dits "granulitiques", ou plus exactement de granites à deux micas.

On peut cependant remarquer que si les premiers indices minéralisés du batholite de Luz y étaient effectivement dans la partie "granulitique" (St Symphorien de Marmagne), les gisements les plus importants sont dans le granite porphyroïde (Bauzot, Les Brosses).

Pour le Hoggar, le problème est légèrement différent. L'attention a été attirée par des granites extrêmement radioactifs en prospection aéroportée, granites intrusifs d'un type potassique à tel point que l'on a fréquemment attribué la radioactivité à l'influence de ^{40}K . Nous avons pu montrer qu'il n'en était rien et que l'uranium était la cause principale de la radioactivité [31].

Le succès des recherches de l'uranium au C.E.A. a donc en grande partie pour base la grande expérience et l'habileté des géologues et prospecteurs du Service Recherches qui ont su intégrer intuitivement un grand nombre de facteurs et en dégager des règles particulièrement fructueuses.

Préciser et délimiter les facteurs intuitifs, éliminer les fausses corrélations, donner des outils de comparaison numérique, tel doit être le sens des recherches géochimiques pour permettre une étape nouvelle dans nos connaissances.

L'étude comparative de l'uranium total dans les divers granites décrits au chapitre II permet d'exposer un certain nombre de règles :

1) Au sein d'un même milieu géochimique, l'uranium se distribue selon une loi lognormale ;

- la valeur moyenne représente l'abondance géochimique dans le milieu donné. Sa valeur est toujours différente de la valeur la plus fréquente, qui est la médiane de la loi de distribution.
- l'écart-type logarithmique de la loi de référence est l'expression de l'histoire géochimique de l'uranium dans le milieu considéré. Résumons les résultats obtenus dans les divers massifs étudiés :

	Vendée	Bretagne		Grury	Elbema
		Granite à 2 micas	Plelauffet Rostrenen		
abondance U ppm	6	4,6	4,5	4,2	6,6
σ	0,22	0,22	0,16	0,22	0,15

L'abondance varie d'un massif à l'autre de façon appréciable. Ces abondances ne semblent pas en liaison directe avec l'intérêt économique des gisements dans les divers massifs. Deux théories se sont, en effet, souvent affrontées : il faut rechercher l'uranium au voisinage des granites riches, ou au contraire, il faut chercher dans les granites pauvres en uranium. Poser le problème ainsi est un peu trop simpliste.

La teneur en uranium total représente l'interaction de nombreux phénomènes complexes, à la fois pendant la mise en place et après la mise en place. Ce n'est pas une grandeur statique mais une grandeur dynamique qui varie d'un jour à l'autre et dépend de nombreux facteurs. Il est en particulier difficile, sinon impossible de connaître la teneur en uranium du magma initial. L'abondance actuelle en uranium total est une valeur qu'il est nécessaire de connaître mais qui ne suffit pas à élucider l'histoire de l'uranium dans les roches.

L'écart-type logarithmique est une valeur typique, liée aux propriétés géochimiques de l'uranium dans les milieux considérés, et reflétant l'amplitude des phénomènes physico-chimiques magmatiques et postmagmatiques.

On constate que, contrairement à l'abondance, cet indice est identique dans les trois massifs hercyniens. Il est légèrement différent dans les granites de Plélauff, Rostrenen, et Elbéma, mais du même ordre de grandeur.

2) Au sein d'un même milieu géochimique, pétrographiquement homogène (Bretagne, Vendée), l'uranium peut avoir une répartition géographique comportant des zones privilégiées d'enrichissement, la distribution statistique globale se rattachant cependant à une même loi de référence.

3) Au sein d'un même milieu géochimique (Grury), une variation dans l'allure pétrographique peut n'entraîner aucune variation connexe dans la distribution géographique de l'uranium.

4) Au sein d'un milieu géochimique homogène, le sens des fluctuations des teneurs en potassium de chaque échantillon individuel ne se superpose pas à celui de l'uranium ; le hasard et les remaniements postmagmatiques créent des désordres locaux. Par contre :

5) Au cours d'un phénomène marqué de différenciation d'un même milieu géochimique, l'uranium suit la partie enrichie en SiO_2 et K_2O (Elbéma, Vendée).

6) La concentration de l'uranium dans les bordures des batholites n'est pas une règle générale. Elle correspond, lorsqu'elle existe, à un type particulier de mise en place du granite.

Forme de l'uranium dans les roches ignées.

On dispose d'une masse considérable de renseignements sur la répartition des éléments radioactifs en général dans les roches. Il n'existe par contre que peu de données sur la répartition de l'uranium lui-même. Il est pour le moins aléatoire d'extrapoler les renseignements relatifs aux groupes de radio-éléments à l'uranium seul.

Prenons un cas simple : supposons qu'un phénomène géochimique banal (altération par exemple) déplace, ne serait-ce que de quelques dixièmes de millimètre, l'uranium initialement en équilibre, en le séparant de ses descendants.

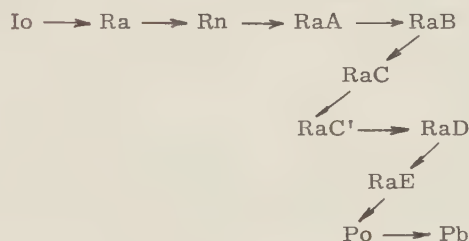
Avant le phénomène, tous les éléments de la filiation émettent le même nombre de rayons par unité de temps. Pour une quantité donnée d'uranium UI émettant un rayon α , l'ensemble de la filiation donne 8α .

Après le phénomène, nous pouvons avoir en un point :



groupe qui se remet très vite en équilibre, mais par contre qui met extrêmement longtemps à reformer de l'ionium (équilibre en 500 000 ans environ).

En un autre point, nous aurons :



l'ensemble décroissant lentement à l'équilibre de régime, commandé par la période de l'ionium.

Donc, d'un côté, tout l'uranium ne donnera plus que 2α au lieu de 8 ; de l'autre, nous aurons encore 6α sans uranium.

Si l'on pense que, d'une part les phénomènes seront plus complexes, les entraînements seulement partiels, et que l'on ne connaîtra pas l'instant initial du phénomène, d'autre part les rayons α de la famille de Th viendront compliquer encore les choses, on comprend la difficulté d'interpréter même qualitativement de telles données, qui sont pourtant celles des émulsions nucléaires.

Il était encore très classique, il y a quelques années, d'attribuer l'uranium des roches ignées à quelques minéraux accessoires : zircon, monazite, sphène, apatite, micas. Les recherches récentes [29] montrent qu'effectivement ces minéraux ont des teneurs élevées en uranium, mais ces teneurs n'expliquent qu'une faible partie de l'uranium total de la roche.

Les parties quartzeuses et feldspathiques peuvent contenir de 35 à 70 pour cent de la quantité totale de l'uranium présent dans cette roche.

Lors de la formation des roches, l'uranium se distribue sous des formes différentes en fonction des conditions géologiques et physico-chimiques.

On admet en général que l'uranium peut se trouver sous 5 formes [44].

1) Minéraux d'uranium.

- Les minéraux primaires d'uranium, dans lesquels l'élément est tétravalent, sont rares, mais il est possible que ces minéraux (brannérite, uraninite, etc.) se trouvent dans les roches sous forme d'in-

clusions submicroscopiques invisibles au microscope polarisant. Lorsqu'ils sont visibles, ils sont disséminés à travers les figures de répartition des grains cristallins.

- Les minéraux secondaires à uranium hexavalent sont plus fréquents et se localisent dans les fissures et dans les minéraux altérés. L'uraninite et les oxydes complexes (niobotantalates) peuvent d'ailleurs être des produits primaires de la cristallisation magmatique ou plutôt avoir une origine secondaire hydrothermale.

2) L'uranium dans les structures minérales.

L'uranium peut se trouver sous forme d'addition isomorphe de minéraux accessoires (zircon, monazite, xénotime, sphène, allanite). Il est d'ailleurs en général difficile de prouver que l'uranium a remplacé des cations dans la structure d'un minéral. Nous pensons en particulier que l'uranium dans le quartz ou les feldspaths est en quasi-totalité sous forme d'inclusions dans les fissures.

Des études approfondies ont été effectuées sur les répartitions dans les zircons, les sphènes, les allanites et les monazites [29]. Les quantités d'uranium sont variables d'un échantillon à l'autre et souvent distribuées par zones. On peut dire qu'en général ce sont les minéraux accessoires mineurs qui renferment la majeure partie de l'uranium contenu dans les structures minérales.

3) L'uranium en position d'échange de cations.

L'échange de cations dans les argiles est tout-à-fait classique. Il est donc tout-à-fait possible de trouver de l'uranium sous cette forme dans les parties altérées des feldspaths. L'uranium peut se trouver aussi en position d'échange de cations dans les zéolites.

4) L'uranium adsorbé.

L'adsorption de l'uranium sur la surface des cristaux a été prédite par la théorie [16] et chimiquement prouvée [4]. La mise en évidence expérimentale de l'adsorption est très difficile. Comme nous l'avons dit, les techniques autoradiographiques, apparemment séduisantes, ne permettent pas cependant de renseigner complètement sur l'uranium lui-même. Hurley [28] par exemple, pense qu'une bonne partie de la radioactivité de la surface des grains est due aux produits de filiation. Picciotto [46] attribue, dans certains cas, la radioactivité interstitielle à de minces couches de minéraux tels que l'épidote. Des lessivages différentiels ont permis d'aboutir à la conclusion que l'uranium est fortement concentré dans les parties externes de cristaux séparés, mais ceci n'est pas une preuve formelle, car on n'a pas pu prouver que l'on dissolvait réellement l'uranium adsorbé et non également l'uranium des minéraux uranifères solubles.

5) L'uranium dissous.

L'uranium peut se trouver dissous dans les inclusions fluides existant dans les minéraux des roches.

Aucun fait expérimental n'a pu prouver que ces liquides contiennent réellement de l'uranium, mais il est logique de penser que si une quantité importante d'uranium soluble existe dans les roches, il s'en est dissous une petite quantité dans les liquides.

La contribution de l'uranium dissous dans les inclusions est, de toute manière, faible devant les autres occurrences.

Il est normal de penser que la quantité correspondant à chaque forme varie d'une roche à l'autre et que, pour être fidèle à nos principes, les tendances générales des phénomènes ne peuvent être dégagées que par l'examen statistique d'un grand nombre d'échantillons.

Il est certain que la détermination de coefficients moyens de partage entre différentes formes est le complément nécessaire de l'étude des répartitions de l'uranium total. Nous avons attaqué ce problème par deux méthodes :

- le dosage de l'uranium dans les diverses fractions minérales de quelques granites,
- le dosage différentiel de l'uranium soluble et de l'uranium insoluble dans tous nos échantillons.

L'uranium dans les diverses fractions minérales.

L'idée la plus naturelle est d'essayer de trier les grains des roches afin de séparer des lots de divers constituants de la roche aussi propres que possible, c'est-à-dire avec le minimum de mélanges d'espèces minéralogiques. C'est ce qui a été fait par un certain nombre de chercheurs et nous donnons dans le tableau suivant quelques résultats de granites étrangers.

Nous les avons sélectionnés pour montrer l'éventail des teneurs possibles. Les résultats des granites du New Hampshire sont intéressants car ils donnent l'étendue des fluctuations qui ont été rencontrées et ceux des granites du Haut-Altai parce qu'ils expriment la contribution relative de l'uranium de chaque minéral à la teneur totale de la roche [21].

	Granite de Campbell (New Hampshire)					Granite du Haut-Altai					
	Granite à biotite U dans le minéral en ppm			Granite à amphibole U dans le minéral en ppm		Granite à biotite		Granite à 2 micas			
	de	à	moyenne	de	à	moyenne	U dans minéral en ppm	% U dans minéral considéré	U dans minéral en ppm	% d'U correspondant au minéral	
Plagioclase	}	2,0	5,3	}	1,3	2,2	}	10	19,5	10	20,5
Microcline											
Quartz											
Magnétite	0,08	32	1,58	1	25	9,6	100	4,1	300	10,5	
Amphibole	16	43	29	1	48,8	20	}	100	8,2	}	150
Biotite			38			20					
Muscovite											
Fluorine			14			63	}	50	0,5	}	100
Apatite											
Ilménite											
Zircon	252	1 750	1 202	755	2 350	1 249	}	3 000	47,7	4 000	38
Monazite											
Allanite	540	656	617			785					
Teneur en U du granite	3,9	18	11,8	7,2	11,6	8,7					

Nous avons donc essayé d'effectuer des triages par lots minéralogiques.

Les moyens perfectionnés de séparation, électromagnétique, électrostatique, et liqueurs denses, dont nous aurions pu disposer au C.E.A. se trouvaient dans les ateliers de préparation mécanique de minerais uranifères extrêmement pollués, et étaient donc pratiquement inutilisables pour nos problèmes.

La technique de préparation des lots a donc été la suivante : on écrase l'échantillon par pression entre deux tas, afin d'éviter autant que possible la production d'éléments fins. Le triage se fait à la pince dans la granulométrie 20 à 30 mesh.

L'expérience nous a rapidement montré que la manipulation n'était pas aussi aisée qu'elle le paraissait et que plusieurs objections sérieuses pouvaient être faites à cette méthode : d'abord les analyses de fractions séparées de minéraux majeurs sont faussées par des inclusions inévitables de minéraux accessoires ; ensuite, le triage dépend de la granulométrie, comme le montrent les expériences suivantes :

Granulométrie mesh.	Vendée X 1		Grury X 2		Elbéma X 3	
	U insol. ppm	U sol. ppm	U insol. ppm	U sol. ppm	U insol. ppm	U sol. ppm
20 - 30	2,8	2,2	0,2	1,8	3	1
30 - 40	3,2	2,2	0,8	2,1	1,9	1,1
> 40	1,9	4,1	1,8	3,2	1,3	4,1
Echantillon total	2	3,5	0,6	2,8	2	3

Les résultats varient donc considérablement avec la granulométrie et d'une manière différente selon les roches et selon qu'on considère l'uranium insoluble ou l'uranium soluble.

On constate que très généralement l'uranium soluble est plus abondant dans les fractions fines, ce qui est normal car cet uranium est souvent dans les parties altérées et pulvérulentes des joints de grain.

L'uranium insoluble qui, nous le verrons, est essentiellement dans les minéraux tels que les zircons, monazites, etc., est au contraire concentré dans les fractions des éléments les plus gros, pour la Vendée et Elbéma. Dans ces échantillons, ces minéraux sont inclus dans des micas. Or le broyage et le tamisage provoquent un enrichissement en micas des fractions à gros grains car ils se clivent plutôt qu'ils ne se brisent.

L'uranium insoluble de Grury semble se concentrer dans la fraction fine ; ceci est probablement dû à ce que l'on a affaire à une roche extrêmement saine et à grains très bien différenciés, pauvre en minéraux insolubles, lesquels ont dû être facilement libérés à l'écrasement.

Le problème est plus facile lorsqu'on s'intéresse uniquement aux minéraux accessoires réfractaires que l'on peut obtenir purs assez aisément par liqueurs denses et séparation électromagnétique. Mais notre attention était plus axée vers l'uranium diffus dans la roche que vers l'uranium inclus dans ces minéraux.

Il s'est donc avéré en fait que les techniques de triage pouvaient tout au plus nous donner des enseignements qualitatifs. Donnons cependant les quelques résultats obtenus ; nous avons d'abord effectué un tri sommaire en trois lots : quartz, feldspaths, micas :

Echantillon	Elbéma X 5		Elbéma X 6	
	U insol. ppm	U sol. ppm	U insol. ppm	U sol. ppm
Quartz	1	2, 4	2	1
Feldspaths	0, 1	2, 3	1	0, 4
Micas	78	32	15	13

On voit qu'une fraction appréciable de l'uranium se trouve dans le quartz et les feldspaths, et que les micas ont une haute teneur en inclusions de minéraux accessoires uranifères mais également une forte teneur en uranium soluble retenu dans les lamelles.

Nous nous sommes alors livrés à un triage extrêmement soigné de feldspaths, quartz et mica dans quelques roches afin d'avoir des grains aussi parfaitement propres que possible. Les résultats sont les suivants :

Echantillon	Vendée X 1		Grury X 2		Elbéma X 3	
	U insol. ppm	U sol. ppm	U insol. ppm	U sol. ppm	U insol. ppm	U sol. ppm
Quartz	4	2	0, 1	1	0, 1	0, 3
Feldspath	1	4	0, 1	0, 7	0, 1	0, 5
Biotite			3	6	13	7
Muscovite	3	2				
Eléments noirs non différenciés	9					

Examinons d'abord l'échantillon de Vendée. Si l'on excepte le mica qui est en quasi-totalité de la

muscovite, il a été impossible de trier proprement les autres minéraux. Les quartz étaient toujours mélangés aux micas, les feldspaths aux quartz. On constate que l'uranium total se partage entre ces divers lots. La muscovite, seul élément bien trié, n'est pas particulièrement riche en uranium. Au contraire, la fraction quartzeuse est riche en uranium insoluble et la fraction feldspathique riche en uranium soluble.

Au contraire, dans les échantillons X 2 et X 3 qui ont pu être triés en lots extrêmement propres, les quartz et les feldspaths ne contiennent que peu d'uranium, presque entièrement sous forme soluble, et les biotites sont très riches en uranium à la fois soluble et insoluble.

Il est à noter que la quantité d'uranium dans les divers lots ne permet pas de boucler le bilan de l'uranium total de la roche. L'uranium manquant se trouve dans les granulométries fines, comme nous l'avons montré.

Nous avons donc renoncé à généraliser ces expériences dont les difficultés pratiques (tri sous bino-culaire) étaient hors de proportion avec les résultats obtenus.

L'étude des formes de l'uranium a été poursuivie par une méthode plus indirecte mais beaucoup plus chimique, quantitative et statistique.

Uranium soluble - Uranium insoluble.

Uranium soluble.

Parmi les formes de l'uranium dans les roches, telles que nous les avons examinées précédemment, peuvent passer facilement en solution :

- 1) Les minéraux uranifères primaires se rapportant aux oxydes ;
- 2) L'uranium adsorbé et en position d'échange de cations ;
- 3) Les minéraux dans lesquels l'uranium est sous forme d'addition isomorphe (zircon, allanite..) si ceux-ci sont à l'état métamicté ;
- 4) L'uranium sous forme de solution dans les inclusions.

Les cas 1 et 2 sont les plus importants.

Donc, pas plus que l'uranium total, l'uranium soluble n'a une seule origine ; mais cet uranium soluble a une unité géochimique dans les phénomènes postmagmatiques, et peut être extrait de la roche par les solutions hydrothermales, pneumatolitiques ou même simplement par les eaux vadoses, et déposé dans d'autres roches. La quantité d'uranium extraite de la roche est déterminée par la composition chimique, l'état d'érosion, d'altération et par la nature des solutions qui traversent la roche.

L'étude de l'uranium soluble peut donc permettre de trouver la liaison génétique entre des gisements uranifères et les intrusions qui font naître les gisements et au voisinage desquelles il faut s'attendre à découvrir des accumulations industrielles.

Uranium insoluble.

Si on excepte les minéraux relativement solubles tels que l'apatite et les accessoires mineurs métamictes, on peut estimer que l'uranium insoluble représente presque tout l'uranium qui se trouvait fixé dans les structures et les défauts de structure des cristaux constituant les roches au moment de l'achèvement de leur cristallisation ou à l'époque de leur dernière recristallisation [44].

Le tableau suivant peut être dressé, résumant les résultats obtenus au chapitre II.

	Vendée				Bretagne						Grury				Elbéma	
U soluble (ppm)	4				4						3				5	
U insol. "	2				1						1				3	
U total "	6				5						4				8	
Panneaux	I	II	III	IV	I	II	III	V	VI	I	II	III	IV	Porphyre		Grenu
U soluble (ppm)	5	4	4	4	3	5	5	4	4	3	3	3	3	4	6	
U insol. "	3	2	2	1	0,5	0,5	0,6	0,5	0,6	1	1	1	1	3	3	

Ce tableau permet de retoucher et de préciser les interprétations que nous avons pu déduire des répartitions de l'uranium total.

Les interprétations sont les suivantes :

Grury : L'uranium soluble représente 75 pour cent de l'uranium total mais en valeur absolue l'abondance de 3 ppm d'U soluble est la plus faible de tous les massifs.

L'homogénéité géochimique du massif s'accompagne d'une homogénéité des distributions géographiques à la fois de l'uranium soluble et de l'uranium insoluble.

Bretagne : L'uranium soluble représente 80 pour cent de l'uranium total mais en valeur absolue son abondance est la même que celle de l'uranium soluble de Vendée.

La répartition géographique de l'uranium insoluble est très homogène dans les divers panneaux. Elle correspond à l'homogénéité pétrochimique du massif.

La répartition géographique de l'uranium soluble est au contraire très différente selon les panneaux. Ceci est du plus haut intérêt car de nombreux points minéralisés ont été trouvés dans ce massif. Ces points ne sont pas en relation rigoureuse avec les zones riches en uranium soluble mais cependant il existe une certaine corrélation.

On peut se demander si ces zones riches sont des auréoles de dispersion primaire qui se sont produites au cours de la mise en place des gites, ou inversement si les gisements sont dûs à une surconcentration locale de l'uranium soluble du granite, là où les caractères géologiques et structuraux s'y prêtaient.

Il est à noter qu'un gisement économique de quelques centaines ou milliers de tonnes d'uranium métal est peu de chose devant l'énorme quantité d'uranium soluble dispersé dans la roche.

Vendée : 67 pour cent de l'uranium est sous forme soluble. L'uranium soluble est fortement concentré dans un panneau mais l'uranium insoluble également. Ce panneau est celui du gisement important de l'Ecarpière.

La forte teneur du panneau ne peut être expliquée par la seule auréole de dispersion du gisement qui ne porterait que sur l'uranium soluble. Il faudrait qu'il y ait eu des phénomènes locaux de recristallisation d'éléments tels que zircon, monazite, etc. On peut plutôt penser que c'est au cours de la mise en place que l'uranium s'est concentré dans les roches de cette région.

Elbéma : 62 pour cent de l'uranium est sous forme soluble. En valeur absolue, le massif est le plus riche à la fois en uranium soluble et insoluble.

L'abondance en uranium insoluble est identique dans le granite porphyroïde et dans le grenu.

Au contraire l'uranium soluble se concentre dans le granite grenu.

On peut donc admettre que la différenciation géochimique s'est terminée après la cristallisation des minéraux tels que le zircon, la monazite, etc.

Ce massif a donné quelques indices uranifères qui ne se sont pas révélés économiquement importants. On peut donc admettre que d'une part, le magma initial était riche en uranium, d'autre part l'uranium n'est pas parti. Ceci était peut-être dû à des causes géologiques (absence de cortège filonien), mais plus probablement à des raisons climatiques, le climat désertique n'ayant pas permis d'entraînement par les eaux de ruissellement comme dans les autres massifs.

CONCLUSION

Il serait vain de vouloir donner des interprétations définitives sur les seules données, même nombreuses, de l'analyse géochimique. Les résultats géochimiques doivent en effet être intégrés dans l'interprétation géologique.

Ce travail n'a pas pour simple but d'amener des résultats géochimiques. Nous avons donné, au cours de la détermination d'un cadre pétrochimique, un aperçu des grandes possibilités des méthodes statistiques. Nous espérons que cela suggèrera aux géologues et pétrographes de nouveaux problèmes qui pourront être résolus par l'outil d'investigation ainsi mis au point.

La connaissance du panorama géochimique de tous les massifs granitiques français, la comparaison entre les granites hercyniens et alpins, la différence de comportement de l'uranium dans les granites d'anatexie et les granites intrusifs, l'uranium dans les séries volcaniques du Massif-Central, tels sont les problèmes qui deviennent à notre portée immédiate.

De ces études sortiront réellement des interprétations générales sur la géochimie des roches ignées et sur le sort de l'uranium dans ces roches.

Comme le fait remarquer Monsieur Raguin :

"La géologie du granite en est encore à un stade élémentaire. Nous avons le sentiment qu'elle se trouve à la base de deux autres sciences géologiques importantes : l'orogénie et la géochimie de l'écorce".

En effet, la recherche des concentrations d'uranium économiquement exploitables exige la connaissance de nombreux processus géologiques. Le concept du cycle géochimique permet de rattacher ces phénomènes à l'histoire géologique et orogénique d'une région. On peut résumer ce cycle en trois phases fondamentales qui d'ailleurs s'interpénètrent :

- la première phase est dominée par les phénomènes ignés ;
- la deuxième est celle de l'érosion, de la sédimentation et des phénomènes biogéochimiques ;
- la troisième revient, par le métamorphisme, aux activités ignées.

Il semble indubitable que la concentration réellement primaire de l'uranium est liée à la phase ignée et au refus de l'ion U^{++} de rentrer dans les structures cristallines les plus courantes au cours d'une recristallisation.

Il est établi sur de nombreuses expériences, que confirment nos résultats, que la teneur en uranium des roches ignées formées à partir d'un milieu géochimique donné augmente constamment depuis les premières roches formées jusqu'aux dernières, et que l'uranium suit la silice et les alcalins.

Par contre, le mécanisme précis de mise en place varie avec les conditions physico-chimiques qui commandent la cristallisation (en particulier, la cristallisation peut avoir lieu en système clos ou au contraire laisser échapper une partie des fluides).

Les phénomènes tectoniques de la fin de la consolidation fixent la forme définitive de l'uranium dans la partie fluide résiduelle. Les fluides résiduels riches en uranium ont pu, soit se perdre, soit être drainés pour former des filons là où les conditions structurales étaient propices. Lorsque les conditions de dépôt n'ont pas été réalisées, l'uranium s'est trouvé emprisonné sous forme de pellicules intergranulaires solubles.

La convergence de la composition géochimique des granites étudiés, qui sont tous accompagnés de manifestations uranifères, est frappante.

Mais n'y a-t-il pas "granite et granite" [45] ? L'uranium peut être un indice précieux dans la recherche des caractères métasomatiques ou magmatiques de certaines roches. Les granites anatectiques ou les migmatites que nous avons eu l'occasion de doser se sont généralement révélés pauvres en uranium (environ 1 ppm). Par contre, nous avons pu constater, en particulier dans le bouclier guyanais, des intrusions nettes de granites jeunes tranchant fortement par leur teneur en uranium plus élevée.

Lorsqu'on examine la quantité d'uranium sous forme facilement soluble, même dans les eaux de ruissellement, on comprend que la plupart des gites uranifères dans les terrains sédimentaires et même dans le granite peuvent ne nécessiter aucune intervention ignée. Si l'on calcule qu'un massif granitique tel que celui de Bretagne contenant 4 grammes d'uranium soluble à la tonne peut libérer, par une érosion de 20 mètres d'épaisseur, près de 20 000 tonnes d'uranium métal, on peut bien admettre la formation de gisements secondaires à partir de l'uranium du granite sans forcément passer par un gisement primaire filonien.

Dans certains cas, les circulations d'eaux sur le granite dans la phase d'érosion auront une action dispersante qui aboutira au rejet à la mer.

Dans d'autres cas au contraire, l'uranium entraîné se trouvant sous forme de complexes anioniques carbonatés, stables dans de larges limites de pH [8], pourra être fixé et reconcentré en de nouveaux gisements par plusieurs mécanismes :

- l'évaporation ;
- le changement de milieu géochimique tel que la rencontre d'ions PO_4 (formation d'autunite) ou d'un milieu réducteur (formation d'oxydes) etc. ;
- la fixation par échange d'ions dans les argiles, les humus, les schistes, etc. ;
- la fixation par la végétation [23] ou les organismes vivants.

Le cycle se boucle par la formation de géosynclinaux où les processus de reconcentration ignés pourront de nouveau se développer.

Nous terminons ce travail par cette vue très schématique du cycle de l'uranium, dans lequel nous avons pu apporter quelques précisions sur la phase ignée.

La prospection rationnelle des gisements d'uranium ne s'est jamais limitée, au Commissariat, à des buts strictement utilitaires et immédiats : on a toujours reconnu la nécessité de recherches fondamentales. Les succès obtenus par les recherches minières d'uranium en France ne sont pas étrangers à cet état d'esprit.

BIBLIOGRAPHIE

- 1 - AHRENS L.H. - The lognormal distribution of the elements - *Geochim. Cosmochimica Acta* G.B., 1954, 6, 2/3, 121-131.
- 2 - AHRENS L.H., RANKAMA K., RUNCORN S.K. - *Physics and Chemistry of the Earth*, Pergamon Press.
- 3 - BOWIE S.H.U. - *Nuclear Emulsion Techniques - Nuclear Geology*.
- 4 - BROWN H., BLAKE W.J., CHODOS A.A., KOWALKOWSKI R., MCKINNEY C.R., NEUERBURG G.J., SILVER L.T., UCHIYAMA. - Leaching studies of interstitial Material in Igneous Rocks (résumé) - *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 1953, 64, 1400-1401.
- 5 - CARRAT M. - Exposé géologique sommaire du Morvan - Groupe d'études géologiques, 27 et 28 juin 1956 - Division de Grury, Morvan, C.E.A.
- 6 - CHAYES F. - *Petrographic Modal Analysis* - John Wiley and sons, New York, 1956.
- 7 - CHAYES F. - The lognormal distribution of elements ; a discussion - *Geochim. Cosmochimica Acta* G.B., 1954, 6, 114-120.
- 8 - CHERVET J., COULOMB R. - Comportement géochimique de l'uranium dans le cycle d'altération - 2ème Conférence sur l'utilisation pacifique de l'Energie Atomique, 15/P/1250, Genève, 1958.
- 9 - CLARKE F.W., WASHINGTON H.S. - The composition of the earth crust U.S. Geol. Survey Prof. Paper N° 127.
- 10 - COPPENS R. - Sur la mesure de la radioactivité des roches par l'émulsion photographique - *Bull. Soc. Fr. Minér. Cristall.*, 1952, 75, 57.
- 11 - CORK J.M. - *Radioactivité et Physique Nucléaire* - Dunod, Paris, 1949.
- 12 - COULOMB R. - Radioactivité du batholite d'Elbema (Hoggar). Corrélations statistiques entre les rayonnements et la composition chimique des granites - *Bull. Soc. Franç. Minér. et Cristall.*, 1958, LXXXI, 227-231.
- 13 - COULOMB R., GOLDSTEIN M. - Prospection géochimique de l'Uranium - *Revue de l'Industrie Minière*, 1956, Janvier, Numéro spécial 1 R, 140-153.
- 14 - COULOMB R., GOLDSTEIN M. - Recueil de méthodes de dosage de l'Uranium utilisées en Géochimie - Note C.E.A. N° 156, 1956.
- 15 - COULOMB R., LEMERCIER M., GOLDSTEIN M. - Etude de la répartition statistique de l'uranium dans les granites. Contribution à la prospection géochimique des grands massifs - Symposium sur l'exploration géochimique. XXe Congrès géologique international, Mexico, 1956.
- 16 - DE VORE G.W. - The role of adsorption in the fractionation and distribution of elements - *Journal of Geology*, 1955, 63, 159-190.
- 17 - EDWARDS G. - Sodium and potassium in meteorites - *Geochim. Cosmochimica Acta*, 1955, 8, 285.
- 18 - FAIRBAIRN H.W. - Precision and Accuracy of Chemical Analysis of Silicate Rocks. *Geochim. Cosmochimica Acta*, 1953, 4, 143-156.
- 19 - FAUL H. - *Nuclear Geology* - John Wiley and Sons, New York, 1955.
- 20 - FERSMAN - *La Géochimie*.

- 21 - GERASIMOVSKII V.I. - The forms of uranium in rocks (en russe) Atom. Energ. SSSR, 1957, 3, 12, 525-529.
- 22 - GOLDSCHMIDT - Geochemistry - Oxford, 1954.
- 23 - GOLDSTEIN M. - Prospection Géobotanique de l'uranium dans l'Estérel - Bull. Soc. Minér. Cristall., 1957, LXXX, 318-324.
- 24 - GRIMALDI, IRVING, MAY, FLETCHER - U.S. Geol. Surv., Fluorimeter Circular 199.
- 25 - GROVES A.W. - Silicate Analysis - George Allen and Unwin Ltd, London, 2nd edition, 1951.
- 26 - HAMILTON E. - Distribution of radioactivity in rocks and minerals, and the effect of weathering on determinations of uranium (lettre) - Nature G.B., 1958, 4610, 697-698.
- 27 - HILLEBRAND W.F., LUNDELL G.E.F. - Applied inorganic Analysis - John Wiley and sons, 1950.
- 28 - HURLEY P.M. - Distribution of radioactivity in granites and possible relation to helium age measurements - Bull. Geol. Soc. Amer., 1950, 61, 1-8.
- 29 - HURLEY P.M., FAIRBAIRN H.W. - Abondance and distribution of uranium and thorium in zircon, sphene, apatite, epidote, and monazite in granite rocks - Trans. Amer. Geophys. Union Fr., 1957, 38, 6, 939-944.
- 30 - JAEGER J.L. - La Géochimie - Presses Universitaires de France, 1957.
- 31 - JEREMINE E., PROVOST P. - Observations géologiques et pétrographiques sur la région de Rostrenen - Bull. Serv. Carte Géol. France, 1955, LIII, N° 243.
- 32 - JOLIOT - CURIE I. - Les Radioéléments Naturels - Hermann, Paris, 1946.
- 33 - KRIGE D.G. - A statistical approach to some mine evaluation and allied problems on the Witwatersrand - Thèse présentée à l'université de Witwatersrand, Johannesburg, 1951.
- 34 - LAFFITE P. - Introduction à l'étude des roches métamorphiques et des gites métalliques - Masson, Paris, 1957.
- 35 - LAMOTTE M. - Initiation aux méthodes statistiques en biologie - Masson, Paris, 1957.
- 36 - LARSEN E.S.J., PHAIR G., GOTTFRIED D., SMITH W.L. - L'uranium dans la différenciation magmatique - 1ère Conférence sur l'utilisation pacifique de l'Energie Atomique, 8/P/17, Genève, 1955.
- 37 - MABILE J. - Notion de calcul de probabilité et de statistique de gisements - Note C.E.A. N° 170, 1956.
- 38 - MASON B. - Principles of geochemistry - John Wiley and sons, New York, 1952.
- 39 - MATHERON G. - Application des méthodes statistiques à l'évaluation des gisements - Amer. Miner., 1955, 50-73.
- 40 - MILLER R.L., GOLDBERG E.D. - The normal distribution in Geochemistry - Geochim. Cosmochim. Acta, 8, 53-62.
- 41 - MONTJALLON A. - Introduction à la Méthode Statistique - Vuibert, 1954.
- 42 - MOTHES J. - Techniques Modernes de contrôle des fabrications - Dunod, 1952.
- 43 - Nations Unies, Géologie de l'Uranium et du Thorium - Volume VI des Actes de la 1ère Conférence sur l'utilisation pacifique de l'Energie Atomique, Genève, 1955.
- 44 - NEUERBURG G.J. - L'uranium dans les roches signées des Etats-Unis d'Amérique - Communication 8/P/16 à la 1ère Conférence de Genève, 1955.
- 45 - PERRIN R. - Granitisation, Métamorphisme et Volcanisme - Amer. J. Science, 1954, 252, N° 8.
- 46 - PICCIOTTO E.E. - Distribution de la radioactivité dans les roches éruptives - Bull. Soc. belge Géol., Paléontologie, Hydrologie, 1950, 59, 170-198.
- 47 - RAGUIN E. - Géologie du granite - Masson, 1957.
- 48 - RANKAMA K. - Isotope geology - Pergamon Press, 1954.
- 49 - RANKAMA K., SAHAMA G. - Geochemistry - The University of Chicago Press, 1949.
- 50 - READ H.H. - Meditations on granite. Part 2 - Geologist's Assoc., London Proc., 1944, 54, pt 2, 64, 85.

- 51 - SANSELME H. - Division minière de Vendée. Géologie régionale - Note intérieure C.E.A., 1955.
- 52 - SHAPIRO A.L., BRANNOCK W.W. - Rapid Analysis of silicate rocks - U.S. Geol. Surv. Bull., 1956, 1036 C.
- 53 - TOMLINSON R.C. - Essais de détermination des erreurs au cours de la préparation d'échantillons destinés à l'analyse au laboratoire - Journal of the Institute of Fuel, 1954, oct., 515-522.
- 54 - UREY H. C. - On the concentration of certain elements at the earth surface, Proc. Roy. Soc. (London), 1953, A 219, 281-292.
- 55 - UREY H. C., CRAIG H. - The composition of the stone meteorites and origin of the meteorites - Geochim. Cosmochimica Acta, 1953, 4, 36.
- 56 - VERNADSKY W. - La Géochimie - Alcan, 1924.
- 57 - WASHINGTON H.S. - The chemical Analysis of Rocks - John Wiley and sons, New York, 1930.

ANNEXE 1

Signification statistique des différences observées sur les valeurs centrales entre divers panneaux d'un même massif.

Nous montrons dans le texte que les échantillons de chaque massif dérivent d'une population mère.

Mais le découpage par zones géographiques implique un choix dans la prise des échantillons et non une extraction au hasard dans l'ensemble.

Les phénomènes géochimiques peuvent avoir groupé dans un panneau, par exemple, des individus d'un type plus potassique et dans l'autre ceux d'un type différent, faisant ainsi une sélection en deux sous-populations différentes.

Un calcul simple permet d'estimer si les différences observées sur les valeurs centrales d'un panneau à l'autre sont significatives ou simplement dues au hasard.

1er exemple : Répartition du potassium en Vendée dans les panneaux I et IV (carte n° 1).

Soient pour chaque panneau :

μ = $\log \gamma$, la médiane ;
 σ^2 la variance ;
 n le nombre d'échantillons.
 $\mu_I = 0,670$ $\sigma_I^2 = 0,0025$ $n_I = 37$
 $\mu_{IV} = 0,634$ $\sigma_{IV}^2 = 0,0025$ $n_{IV} = 35$

La différence $\mu_I - \mu_{IV} = 0,036$: la variation d'un panneau centré sur $K_2O = 4,3$ pour cent à un autre centré sur 4,7 pour cent est-elle significative ?

L'erreur standard de la différence des moyennes est :

$$s = \sqrt{\frac{\sigma_I^2}{n_I} + \frac{\sigma_{IV}^2}{n_{IV}}}$$

$$s = \sqrt{\frac{0,0025}{37} + \frac{0,0025}{35}} = 0,012$$

Formons le rapport :

$$t = \frac{\mu_I - \mu_{IV}}{s}$$

$$t = \frac{0,036}{0,012} = 3$$

La théorie montre que si la valeur de t est supérieure à 2, la probabilité pour que la différence soit significative est de 95 pour cent ; si t est supérieur à 2,6, ce "seuil de sécurité" est de 99 pour cent. $t = 3$ implique donc que la différence observée est significative et qu'une explication géologique doit être recherchée.

2ème exemple : Répartition du potassium à Grury dans les panneaux I et IV (carte n° 3).

$$\mu_I = 0,672 \quad \sigma_I^2 = 0,0036 \quad n_I = 36$$

$$\mu_{IV} = 0,654 \quad \sigma_{IV}^2 = 0,0036 \quad n_{IV} = 34$$

$$\mu_I - \mu_{IV} = 0,018$$

$$s = \sqrt{\frac{0,0036}{36} + \frac{0,0036}{34}} = 0,015$$

$$t = \frac{0,018}{0,015} = 1,2$$

Le seuil de sécurité de 95 pour cent ($t = 2$) n'étant pas atteint, on peut dire que la différence observée n'est pas significative et peut être attribuée aux fluctuations du hasard.

ANNEXE 2

Essai d'ajustement normal.

Dans certains cas, tels que ceux d'éléments majeurs peu dispersés, on peut hésiter entre un ajustement normal et lognormal. Mais alors que l'ajustement lognormal est correct dans tous les cas, on peut montrer qu'il n'en est pas de même pour les autres lois de référence.

Exemple : essai d'ajustement de l'uranium de Vendée à une loi normale :

intervalles	effectifs	effectifs cumulés	fréquences cumulées en pourcentage
0	5	163	100
2	49	158	96
4	49	109	67
6	32	60	37
8	8	28	17
10	7	20	12
12	7	13	8
14	5	6	3,7
16	1	1	0,6
18			

Le test de la droite de Henry sur papier gauss-arithmétique montre que les points expérimentaux ne s'alignent plus du tout (fig. 10). Ceci justifie le reflet de l'ajustement normal.

Au contraire, l'ajustement lognormal (sur papier gauss-logarithmique) est correct (fig. 3).

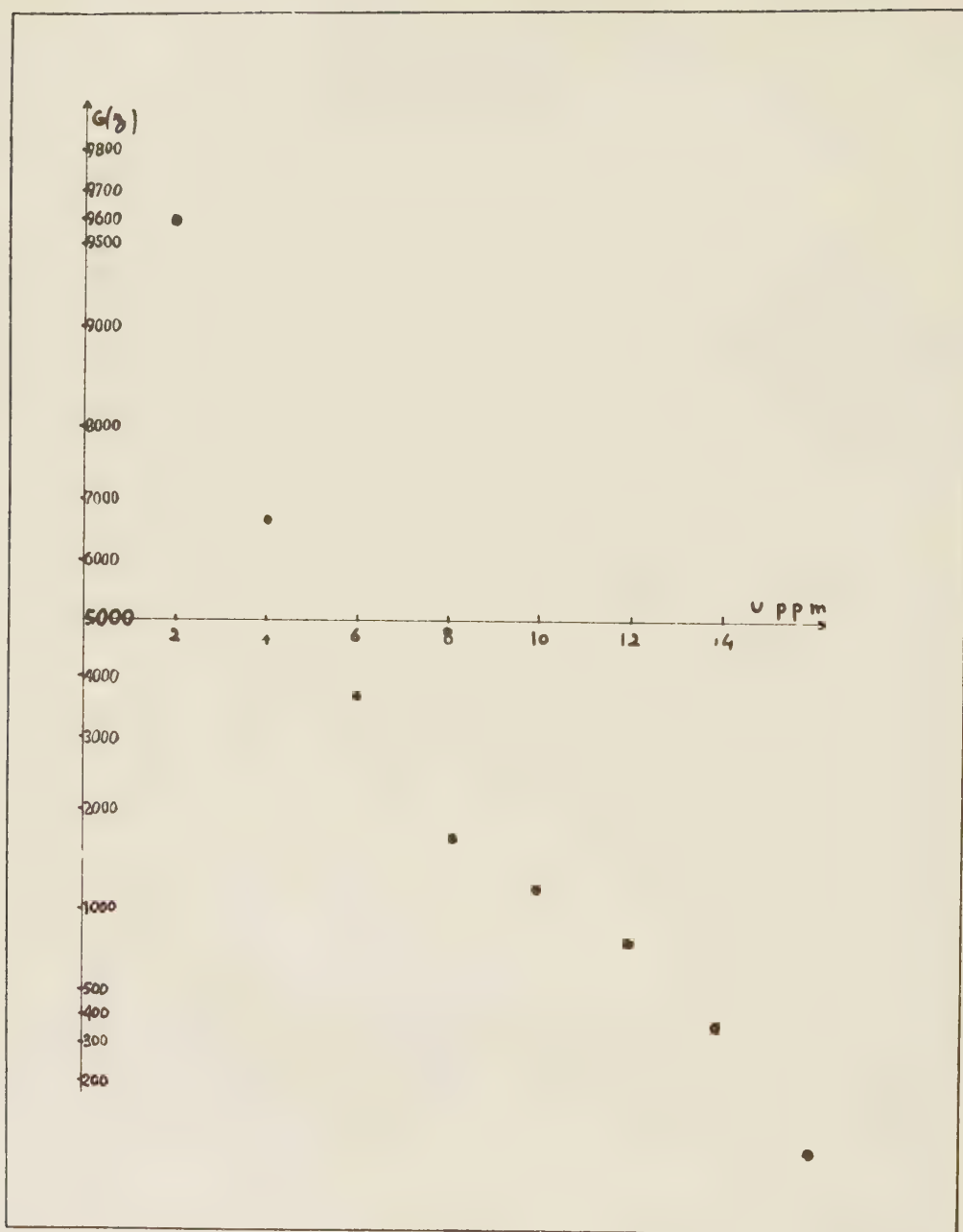


Figure 10 - Vendée
Essai d'ajustement de l'uranium à une loi normale.

Ia - VENDEE - Analyses classiques.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	H ₂ O ₋	H ₂ O ₊
Brosses	73	14,37	1,88	0,59	0,07	0,45	0,95	2,51	4,17	0,6	0,68	0,50	0,80
Ecarpière 1	72,85	14,72	3,1	1,16	0,05	1,35	0,35	1,75	1,95	0,10	0,63	0,55	1,30
Ecarpière 2	63,30	16,85	3,83	0,86	0,07	1,40	1,10	4,72	3,85	0,50	0,86	0,60	1,52
La Chèvre	70,25	14,82	2,93	1,19	0,07	1,74	0,15	3,44	3,95	0,05	0,68	0,2	0,5
La Chapelle	72,80	13,20	1,02	1,38	0,05	0,91	1,14	2,55	5,30	0,45	0,10	0,2	0,67
Montigné 1	73,02	14,38	0,52	1,3	0,05	0,87	1,02	3,45	3,95	0,40	0,10	0,12	0,60
Montigné 2	73,02	14,75	2,11	0,44	0,02	0,84	0,8	3,04	3,94	0,10	0,30	0,40	0,12
1	71,67	13,25	0,16	1,59	0,04	1,02		4,93	4,32	0,32	0,64	0,12	0,5
10	70,05	16	0,72	1,19	0,05	0,75		3,65	4,82	0,39	0,45	0,47	1,14
15	70,92	11,70	3,5	3,78	0,15	0,53	0,53	1,64	3,30	0,25	0,48	0,24	1,65
31	69,20	15,5	1,70	1,43	0,04	1,05	0,38	3,14	5,46		0,26	0,26	0,55
39	68,42	16,25	1,03	1,8	0,05	1		4,05	4,44	0,15	0,40	0,15	0,70
42	68,50	15,9	1,12	1,5	0,06	1,6	0,6	3,73	4,57	0,22	0,43	0,30	0,70
45	71,16	14,56	2,35	1,4		0,84		3,73	4,88	0,18	0,49	0,28	0,49
200	72,10	14,97	1,05	0,86	0,98	0,98		3,30	5,12		0,32	0,32	0,27
210	71,09	15,9	1,45	0,64	1,23	1,23	0,5	2,68	4,98		0,21	0,43	0,52
215	71,59	16,51	0,72	0,57	1,37	1,37		2,96	4,89		0,32	0,10	0,86
217	71,46	15,85	1,41	0,75	1,15	1,15		3,10	4,93		0,24	0,36	1,51
234	70,69	15,35	1,61	1,29	1,88	1,88	1,20	3,02	3,85		0,27	0,27	0,29
238	71,49	15,17	1,83	1,07	1,13	1,13	0,9	2,57	4,54		0,58	0,56	0,39
252	70,69	16,20	1,33	0,97	1,12	1,12	1,27	2,95	3,46		0,17	0,20	1,80
278	70,41	14,65	2,25	0,86	1,06	1,06	0,95	3,14	4,52		0,64	0,34	0,37
291	68,68	17,9	1,95	0,89	1,05	1,05	0,25	3,40	4,08			0,41	1,11

Ib - VENDEE - Analyses rapides.

N°	FeO (*)	Fe ₂ O ₃ (*)	Na ₂ O (*)	K ₂ O (*)	CaO (*)	MgO (*)	Al ₂ O ₃ (*)
2	1,1	0,7	3,1	5,2	1,4	1	16,5
11	0,5	1,3	2,8	5	0,5	0,1	16,5
14	1	0,5	2,8	5,1	0,5	0,1	13,8
18	1,4	0,5	2,9	4,8	0,3	0,2	16,5
21	1	0,7	3,3	4,9	0,5	0,1	13,4
24	1,2	0,4	3,8	4,4	0,7	0,2	14,2
26	1,3	0,4	3	4,1	0,6	0,1	13,1
31	1,4	1,6	2,9	5,3	1,2	0,6	15,3
35	1,3	1,5	3	5,3	0,3	0,4	13,7
42	1,4	1,5	3,7	4,6	1,7	0,9	15,5
45	1,9	0,8	3,3	4,4	0,8	0,2	14,2
46	0,7	0,7	3,7	4	0,6	0,1	15
47	1,4	0,5	3	4,9	0,4	0,4	16
48	1,5	1,1	2,9	5,1	0,6	0,4	14,8
49	1,1	2,2	2,6	5,1	0,6	0,4	14,7
51	1,7	1,4	3,2	5	0,7	0,5	14
54	1,3	1,7	3,1	5,2	0,6	0,2	14,1
58	1,5	1,8	3	4,9	0,9	0,2	14,7
64	0,7	2,3	2,7	4,9	0,6	0,2	14,5
200	1,1	0,8	3,3	5	0,9	0,2	14,8
202	0,5	0,9	3,5	4,6	1	0,2	16
204	0,7	1,1	2,7	5	0,7	0,4	17
206	0,7	1,2	2,3	4,7	0,8	0,3	17
208	0,8	0,5	2,9	4,4	0,7	0,1	16,5
210	0,5	1,3	2,8	5	0,9	0,5	15,5
212	0,5	0,7	3,2	4,9	0,7	0,1	15,2
214	0,6	0,7	3	5,2	0,7	0,1	15,4
216	1,2	1,4	2,7	3,7			15,5
218	0,5	0,5	2,6	4,8	0,6	0	16,4
220	0,5	1,5	2,3	4,9	0,5	0,3	11,6
222	1,1	1,3	3,4	4,4	1,2	0,4	14
226	0,9	1	3	4,7	0,9	0,3	
230	1	1,5	2,9	5,4	0,8		14,5
232	1,2	1,3	2,8	6	0,8		14,2
234	1,4	1,5	3	3,9	1,3	0,9	15,1
238	1,7	1,1	2,7	4,6	0,9	0,7	15,3
242	1,5	0,2	3,2	4,4	0,7	0,2	15,6
247	0,6	2,4	2,6	5,1	0,8	0,4	16,5
251	1,1	1,8	2,9	4,8	1	0,5	16,4
254	0,9	0,6	2,5	4,5	0,6	0,3	13,9
256	1,2	1,1	3	5	0,6	0,5	17,2
260	1	1,2	3,1	4,5	0,8	0,2	15,4
264	1,2	1	2,2	4,4	0,6	0,4	16,7
266	0,8	0,9	3,1	5	0,4	0,2	12,6
268	1,8	0,5	3,7	4,4	0,6	0,5	17,1
272	1,3	1	3,8	4,4	1,4	0,7	15
275	1,5	0,5	3,4	4,8	0,8	0,9	15
279			3	3	0,6	0,3	16
283			3,5	4,2	0,9	0,8	15,5
291			3,5	4,1	0,7	0,5	15,5

(*) - en pourcentage.

Tableau I c.

VENDEE

N°	U total ppm	U soluble ppm	U insoluble ppm	$\frac{U \text{ soluble}}{U \text{ total.}}$	K ₂ O (*)	Na ₂ O (*)	α chocs / 15 mn	β chocs / minute
1	5	4,3	0,7	0,86	4,3	4,9		10
2	8	3,6	4,4	0,45	5,1	3	29	10
2 bis	14	11	3	0,76	3,9	3,7	35	8
3	2,2	1,3	0,9	0,59	3,2	2,2	28	1
4	7,4	4,6	2,8	0,62	4,5	3,4	34	4
5	5,5	3,8	1,7	0,69	4,6	3,1	21	7
6	5,5	5,5	0	1	5,1	3,1		8
7	8	6	2	0,75	5,6	2,9	40	17
8	7	3	4	0,43	5,5	1	49	9
9	3,3	2,4	0,9	0,73	4,1	3,6	10	6
9'	2	0,9	1,1	0,45	4,3	3,5	0	6
10	8	12	0	1,5	4,8	2,7		12
11	2,7	0,8	1,9	0,30	5,1	2,8	17	7
12	3,8	2,9	0,9	0,72	4,4	3,9	11	5
13	0,7	0,3	0,4	0,43	1,3	2,9	3	1
14	7,5	5	2,5	0,67	4,7	3,3	31	14
14 bis	12,4	8	4,4	0,64	4,6	3,3	12	11
15	2,3	1,8	0,5	0,78	3,3	1,9		7
16	5,7	3	2,7	0,53	5,2	3,3	26	14
17	7,2	4,5	2,7	0,63	4,9	2,5	43	17
18	9,4	6,7	2,7	0,71	4,8	2,9	42	17
19	9	6,7	2,3	0,74	4,8	3,4	32	10
20	6	6	0	1	5	3,5		8
21	6	3,1	2,9	0,52	4,7	3,3	18	19
22	7,9	4,6	3,3	0,58	4,7	3,4	31	14
23	4,8	2,6	1,2	0,54	4,7	3,3	23	11
24	16	14	2	0,82	4,4	3,7	54	20
25	6,8	10	0	1,4	4,6	3,1		12
26	14	11,3	2,7	0,82	4,1	3	32	14
26'	3	1,3	1,7	0,43	3	3,5	17	11
27	3,1	1,4	1,7	0,45	4,9	3,5	10	11
28	2,6	2	1,6	0,77				
29	4,5	3	1,5	0,67	2,9	1,5	7	8
30	2,8	2	1,8	0,71	5,2	4,9		8
31	2,5	1,8	0,7	0,72	5	2,9	37	12
32	4	3	1	0,75	6,7	2,2	13	10
33	6	2,7	3,3	0,45	5,1	3,5	38	10
35	9,9	7,8	1,2	0,79	5,3	3	32	15
36	3,8	1,4	2,4	0,37	4,6	3,6	14	7
37	2	1,4	0,6	0,70	4,7	4,1		11
40	1,5	0,5	1,0	0,33	1,6	4,2	4	4
42	3,5	2,8	0,7	0,80	4,6	3,7	18	13
43	2,3	1,6	0,7	0,70	4,6	3,1	12	10
44 bis	5,2	2,5	2,7	0,48	4,2	3,7	24	12
45	15	13	2	0,87	4,9	3,7		13
45 bis	15	12	2	0,80	4,4	3,3	48	17
46	15	14	1	0,93	4	3,7	25	12
46'	9	8	1	0,89	4,2	2,8	38	14
47	5,2	2,7	2,5	0,52	4,9	3	12	15
48	4,7	3	1,7	0,64	5,1	2,9	28	18
49	10,3	4	6,3	0,40	5,1	2,6	25	8
50	3	3	0	1,00	4,3	3,9		9
50'	1,5	1,2	0,3	0,80	3,9	3,8	14	5
51	7,1	6	1,1	0,86	5	3,2	53	16

(*) en pourcentage.

N°	U total ppm	U soluble ppm	U insoluble ppm	$\frac{U \text{ soluble}}{U \text{ total}(*)}$	K ₂ O (*)	Na ₂ O (*)	α chocs / 15 mn	β chocs / minute
52	7,4	5,5	1,9	0,75	5	3,2		8
53	5,3	4	1,3	0,76	5	2,8	10	8
54	4,3	2,5	1,8	0,58	5,2	3,1	20	10
55	4	3	1	0,75	5,3	3,4		13
56	4	2,4	1,6	0,60	6,1	3,2	25	9
56 [†]	3,5	2,8	0,7	0,80	6	3,3	21	10
57	3,8	2	1,8	0,53	5,2	2,7	55	11
58	6,2	4,7	1,5	0,76	4,9	3	52	11
59	7	4,3	2,7	0,62	4,5	2,9	25	14
60	8	7,5	0,5	0,93	5,2	3,3	15	12
60 [†]	6,5	4,3	2,2	0,66	5,1	3,2	28	14
61	6	5	1	0,83	4,7	2,9	13	10
62	3	2	1	0,67	4,2	2,9	27	8
62 [†]	5	2,6	2,4	0,52	4,6	3,2	12	12
63	1,9	1,7	0,2	0,89	5	3,2	3	8
64	4,8	3,3	1,5	0,69	4,9	2,7	12	16
65	3,5	4		0,88	4,8	2,8		8
66	5	3,1	1,9	0,62	4,8	2,7	25	13
200	4,5	2,7	1,8	0,60	5	3,3	26	11
201	4	1,7	2,4	0,43	5,1	2,7	20	13
202	5,8	2,3	3,5	0,40	4,6	3,5	24	13
203	3,4	1,2	2,2	0,35	4,4	2,9	12	9
204	15,5	8	7,5	0,52	5	2,7	43	16
205	10,5	4,3	6,2	0,40	5,1	3	45	13
205	6,2	5,8	0,4	0,92				
206	13	6,7	0,3	0,51	4,7	2,3	62	15
207	7	4,7	2,3	0,67	4,7	3	57	14
208	6,1	3,8	2,3	0,62	4,4	2,9	19	9
209	6,4	3,2	3,2	0,50	5,2	3,2	27	13
210	3	1,9	2,1	0,64	5	2,9	34	14
211	9	3	6	0,33	5	2,9	41	13
212	7,8	6,4	1,4	0,82	4,9	3,2	30	23
213	4,3	2	2,3	0,46	4,3	3,1	27	12
214	5	2,6	2,4	0,52	5,2	3	10	10
215	10	8	2	0,80	5,1	2,4	63	14
216	6	2,7	3,3	0,45	3,7	2,7	64	12
217	12	7,5	4,5	0,62	4,9	3	63	14
218	7,1	5	2,1	0,70	4,8	2,6	13	11
219	5	2	3	0,40	5	2,9	17	9
220	5,7	2,4	3,3	0,42	4,9	2,3	23	11
221	4,2	1,6	2,6	0,38	5,2	2,5	24	13
222	10,6	5,3	5,3	0,50	4,4	3,4	61	16
223	8	3	5	0,37	4,9	2,5	32	19
224	13	8	5	0,61	4,4	3,2	42	29
225	3	1,8	1,2	0,60	4,7	2,4	35	14
226	7,8	3	4,8	0,38	4,7	3	38	13
227	5	2	3	0,40	4,7	3,4	14	11
228	6	3,6	2,4	0,60	5,8	2,9	62	26
229	11	6	5	0,54	4,7	2,8	39	15
230	4,8	2,5	1,3	0,52	5,4	2,9	30	34
231	7	3	4	0,43	4,4	2,8	46	19
232	3,5	3	0,5	0,86	6	2,8	49	15
233	3	1	2	0,33	4,9	4	18	13
234	6	4	2	0,67	4,5	3,1	33	12
235	3	1	2	0,33	5,2	3,2	16	11
236	3	1	2	0,33	4,8	3	8	10
237	4	1,5	2,5	0,26	3,6	2,1	32	11

(*) en pourcentage.

N°	U total ppm	U soluble ppm	U insoluble ppm	$\frac{\text{U soluble}}{\text{U total}}(*)$	K ₂ O (*)	Na ₂ O (*)	α chocs / 15 mn	β chocs / minute
238	6	4,6	1,4	0,77	4,6	2,7	48	11
239	2,8	2	0,8	0,72	4,6	2,5	12	20
240	4,6	2,4	1,2	0,52	5	2,9	30	10
241	4,1	1,8	2,3	0,44	5	2,8	18	14
242	5	3,5	1,5	0,70	4,4	3,2	33	10
243	6,4	5,6	0,8	0,88	4,3	2,6	35	12
245	4,5	4	0,5	0,89	4,4	3,3	31	9
246	3,4	3,1	0,3	0,91	4,7	2,4	29	14
247	3,8	2,3	1,5	0,61	5,1	2,6	54	15
248	7,3	4	3,3	0,55	4,4	2,7	23	13
249	5	4,6	0,4	0,92	4,4	2,6	61	10
250	3,1	2,7	0,4	0,90	4	3,1	30	21
251	5	3,5	1,5	0,70	4,8	2,9	36	15
252	12	9	3	0,75	3,5	3	48	27
253	7,8	4	3,8	0,51	5,6	3	65	20
254	3,5	2	1,5	0,57	3,3	2,1	13	11
256	6,5	3,6	2,9	0,55	5	3,1	34	22
257	4,6	2	2,6	0,44	5,1	2,6	30	17
258	5,5	2	3,5	0,36	5	2,7	26	14
259	25	25	0	1,00	4,3	3,9	70	18
260	8	5	3	0,62	4,7	3,1	36	13
261	6	5,9	0,1	0,98	4,6	2,4	32	13
262	7,8	7	0,8	0,91	4,8	3,7	40	16
263	2,5	1	1,5	0,40	3,8	3,4	12	11
264	8,5	7	1,5	0,82	4,4	2,2	37	12
265	2,2	1,2	1	0,55	5,1	2,6	33	9
266	13,4	11	2,4	0,82	5	3,1	50	19
267	13	10	3	0,77	5,4	3,3	33	16
268	2,4	1,4	1	0,58	4,4	3,7	18	7
269	3,4	2	1,4	0,59	4,4	3,7	22	13
270	4,6	3,8	0,8	0,82	4,7	3,7	20	7
271	11,5	9	2,5	0,78	3,7	3,9	49	13
272	4,4	4,2	0,2	0,96	4,4	3,8	13	10
273	3,5	2,3	1,2	0,66	4,2	3	17	12
274	3	2	1	0,67	4,6	3,9	7	8
275	4,8	2,6	2,2	0,54	4,8	3,4	38	11
275'	5,6	4	1,6	0,71	5	3,2	39	13
276	3,8	2,5	1,3	0,66	4,1	2,5	29	10
277	3,4	3	0,4	0,88	4,6	2,7	24	13
278	4,5	2,7	1,8	0,60	4,5	3,1	13	9
279	3	2,3	0,7	0,77	3	3	19	11
280	4,9	2,2	2,7	0,45	4,8	3,7	22	14
281	3,3	1,8	1,5	0,41	3,8	3,7	6	9
282	4,4	2,4	2,0	0,55	4,4	3,8	18	9
283	2,6	2	0,6	0,77	4	2	12	12
284	7	4,5	2,5	0,64	4,1	3,1	25	7
285	5	3,8	1,2	0,74	5,1	3,4	27	11
286	4	2,5	1,5	0,63	3,9	3,9	10	10
287	5,8	3,1	2,7	0,53	4,2	3,5	24	8
288	5	3,2	1,8	0,64	5	3,2	12	12
289	4	2,4	2,4	0,60	4,6	2,2	11	9
290	1,7	1	0,7	0,59	3,8	2,1	14	11
291	4	2,6	1,4	0,66	4,1	3,5	17	11
292	6,7	5	1,7	0,75	5	4,6	18	14

(*) en pourcentage.

IIa - BRETAGNE - Analyses classiques.

N°	SiO ₂ (*)	Al ₂ O ₃ (*)	Fe ₂ O ₃ (*)	MnO (*)	CaO (*)	MgO (*)	Na ₂ O (*)	K ₂ O (*)	TiO ₂ (*)	P ₂ O ₅ (*)	H ₂ O ₋ (*)	H ₂ O ₊ (*)
8	70,12	13,80	2,80	tr	1,93		3,31	4,57	tr	0,63	0,36	0,64
32	71,26	14,28	2,24	0,05	1,40		3,68	4,74	0,34	0,37	0,27	0,30
41	72,54	12,56	0,24	0,05	1,33		3,32	4,87	0,27	0,62	0,23	0,62
55	72,25	10,47	3,03	0,5	0,95		3,42	4,55		0,49	0,28	0,66
60	73,26	15,63	0,75	0,76	0,77	0,50	2,75	4,85		0,12	0,45	0,90
79	69,55	16,87	1,78	1,72	1,29	0,62	3,32	3,06		0,29	0,14	0,59
94	69,71	16,00	0,63	2,01	2,17	0,95	3,28	4,71		0,21	0,19	0,21
106	58,32	18,64	1,65	4,90	4,85	4,23	3,12	3,47		0,40	0,13	0,5
120	70,37	16,35	1,07	1,20	1,05	0,70	3,61	4,64		0,40	0,19	0,55
129	73,26	14,07	1,29	0,64	1,19	0,55	3,28	4,85		0,45	0,15	0,73
132	69,90	16,17	1,04	1,15	0,73	0,5	2,99	6,77		0,51	0,09	0,71
157	71,65	17,10	0,78	0,60	0,97		2,92	4,60		0,41	0,87	0,25
164	65,28	18,00	1,35	4,20	3,29	0,26	3,22	3,85	0,17	0,31	0,12	0,48
168	68,74	15,49	1,20	2,52	1,84	0,26	3,06	4,59	0,09	0,24	0,32	0,94
173	72,98	15,05	1,03	0,8	0,84	0,01	3,25	4,49		0,38	0,31	0,85

(*) en pourcentage.

IIb - BRETAGNE - Analyses rapides.

N°	FeO (*)	Fe ₂ O ₃ (*)	Na ₂ O (*)	K ₂ O (*)	CaO (*)	MgO (*)	Al ₂ O ₃ (*)
11	1	0,6	3,1	4,7	0,6	0,4	15,3
12	1	1,1	3,5	4,2	1,3	0,6	14,8
15	0,9	0,5	3,6	5,1	0,6	0,3	15,3
23	0,9	0,5	6,7	1,3	1,3	0,4	15,7
25	1	0,5	3,1	5	0,5	0,3	14,5
29	1,5	1,7	2,5	4,2	0,5	0,5	14,8
37	0,8	0,7	3,3	4,5	0,6	0,3	15,4
42	1,2	1,3	2	5,8	0,5	0,5	13,5
48	1,2	0,8	3,7	4,8	0,6	0,4	15,3
53	1,3	0,8	3	4,8	0,5	0,4	14,4
85	0,5	0,6	2,9	4,6	0,6	0,3	15,1
86	6,2	1,4	3,1	3,3	6,9	3,5	17
89	1,2	0,9	2,6	4,9	0,5	0,6	14,6
99	1,6	1,1	2,8	4,5	0,6	0,7	16,7
101	2,5	0,6	3,7	3,7	1,9	1,2	15,5
102	1,6	0,8	3,1	4,8	0,8	0,6	15,7
108	1,5	0,3	2,4	5,2	0,5	0,3	15,4
115	1,4	0,8	3,2	5,1	0,6	0,5	14,7
117	0,8	0,4	3,6	4,3	0,8	0,3	14,1
127	0,8	1,7	3,5	4	0,6	0,3	15,1
138	0,7	0,3	2,7	3,9	0,9	0,1	14,7
140	1,1	0,5	3	4,3	0,4	0,2	15,6
145	1	0,7	3,4	4,2	0,6	0,3	13,6
148	1,2	0,8	3,3	4,5	0,7	0,4	15,5
153	0,7	0,6	3,4	4,8	0,3	0,4	15,2
158	1,3	1,0	3,4	3,5	0,7	0,4	16,4
166	3,7	1,1	3,3	4,5	2,1	1,3	15
167	1,3	0,7	2,4	4	0,6	0,5	16,8
170	0,5	1	3,1	4,8	0,3	0,3	13,9
176	1,3	0,6	3,1	4,7	0,6	0,5	15,2
206	0,7	0,5	2,6	4,6	0,4	0,3	14,3
210	0,7	0,6	2,2	3,8	0,4	0,4	12,4
216	2,4	3	0,8	2,5	1,1	0,7	14,7
220	0,5	0,9	2,5	4,5	0,3	0,4	14,5
223	0,4	1,4	3,1	4,3	0,5	0,3	14,7
225	1,3	0,9	2,4	5	0,4	0,3	14,1
228	0,9	1,1	2,8	4,6	0,6	0,2	14,9
230	1,2	0,8	2,7	5,2	0,3	0,4	13,6
252	1,1	0,6	2,9	3,9	0,6	0,3	16,7
256	1	0,7	3,2	5	0,3	0,4	18
258	0,6	0,7	3,2	4,4	0,6	0,3	14,7
262	0,8	0,5	3,5	4,3	0,2	0,2	14,4
266	0,4	0,5	2,3	4,8	0,5	0,3	13,9
269	0,6	1	3	4,8	0,6	0,3	15,5

(*) en pourcentage.

Tableau II c.

BRETAGNE

N°	U total ppm	U soluble ppm	U insoluble ppm	$\frac{\text{U soluble}}{\text{U total}}(*)$	K ₂ O (*)	Na ₂ O (*)	α chocs / 15 mn.
8	6,6	5	1,6	76	4,6	3,3	26
9	6	6	0	100	4,9	3	27
10	3,5	3	0,5		4,5	3,3	
11	2,3	1,8	0,5	78	4,7	3,1	12
12	3,5	3	0,5	86	4,2	3,5	11
13	3,9	2,7	1,2	69	3,8	3,8	11
14	4,5	5	0		5	3,3	30
15	6	5,5	0,5	92	5,1	3,6	12
16	3,9	2,6	1,3	67	4,9	3,2	27
17	3,4	2,5	0,8	76	4,8	3,9	16
18	2	1,5	0,5	75	4,8	3,3	
19	5,8	4,8	1,0	83	4,6	3,6	18
20	4,2	2,5	1,7	60	4,5	3,8	
22	1,7	1,6	0,1	99	2,2	5,4	7
23	2,3	2	0,3	82	1,3	6,7	7
24	1,5	1,1	0,4	73	4,4	4,2	13
25	4	4	0	100	5	3,1	15
26	4	3,2	0,8	80	4,3	3,4	22
27	6,6	6	0,6	91	5,6	2,8	6
27 bis	4	3,7	0,3	92	4,6	3,3	27
28	4,5	4,5	0	100	4,8	3,1	15
28 bis	5,5	5,4	0,1	98	4,7	3,5	26
29	2,5	1,8	0,7	72	4,2	2,5	21
30	5,2	4,2	1	81	4,9	3	19
31	1,6	0,9	0,7	56			5
32	1,8	0,8	1	45	4,3	3,7	10
33	3	2,7	0,3	90	4,8	3,6	18
34	3	2,4	0,6	80	4,6	3,1	18
35	3,1	3	0,1	97	5	2,8	23
36	2,8	2,1	0,7	75	2,6	4,8	7
37	3,5	4	0		4,5	3,3	17
38	3,8	2,8	1	74	5,2	2,3	25
39	3	2,2	0,8	74	4,5	3,1	17
41	4	4	0	100	4,7	3,3	13
42	4,8	4,2	0,6	88	5,8	2	26
42 bis	4,8	4,2	0,6	88	4,3	3,0	20
44	2,2	1,8	0,4	82	5,2	3	13
45	3	3	0	100	5,1	3	11
46	4,2	5	0		4,5	2	21
47	4	4	0	100	4,7	3	11
48	5	4,2	0,8	84	4,8	3,7	15
48 bis	4,6	4,1	0,5	89			11
49	3,8	3,3	0,5	92	5,4	2,6	20
50	4,1	3,3	0,8	81	5,8	2,7	15
51	4,3	3	1,3	75			14
53	4,3	6	0		4,8	3	25
54	5,6	5,4	0,2	97	5	2,8	43
55	5	5	0	100	4,5	3,6	11
56	3,4	3,2	0,2	95			17
56 bis	6,4	5,7	0,7	89	5,1	2,3	39
57	2,3	1,9	0,4	83	5,4	3,3	19
58	3,8	3,6	0,2	95	4,4	3,1	8
59	2,2	1,9	0,3	86	5	2,7	12
60	2,7	2,2	0,5	81	4,9	2,8	13

(*) en pourcentage

N°	U total ppm	U soluble ppm	U insoluble ppm	$\frac{\text{U soluble}}{\text{U total}} (*)$	K ₂ O (*)	Na ₂ O (*)	α chocs / 15 mn.
61	6,5	4,8	1,7	74	5,3	2,1	14
62	7	5,5	1,5	79	4,8	3,1	23
62'	6,6	5,5	1,1	83	4,2	2,9	24
63	3,6	3	0,6	97	4,5	3,7	23
64	2,7	1,7	1,0	63	5,2	3,2	14
65	4	4	0	100	5	3,3	20
66	2,7	2,6	0,1	96	4,4	3,5	10
67	3,1	2,2	0,9	71	3,1	3,5	28
69	3,6	2,8	0,8	78	3,7	3,4	17
69'	5,1	2,6	2,5	51			
70	5	1,8	3,2	36	4,7	2,9	36
71	3	2	1	67	6,2	2,8	17
72	5	4	1	80	5,1	3,2	20
73	3,4	3	0,4	88	4,3	3,4	15
74	3,4	5	0		5,1	2,9	40
75	4,7	4,6	0,1	98	4,7	3,1	28
75'	4	3,6	0,4	90			30
76	4	3,4	0,6	85	4,9	3,1	10
78	6	4,3	1,7	72	5,4	3,2	19
79	5,5	3	2,5	55	3,1	3,3	
81	5	4,7	0,8	94	5	3,2	8
82	8,2	7,2	1,0	88	5	2,7	22
83	5,9	5,7	0,2	96	4,9	3,2	19
84	2,7	1,7	1	63	5,2	2,3	13
84'	3,6	1,4	2,2	39			16
85	3	3	0	100	4,6	2,9	12
86	4,5	3,5	1	78	3,3	3,1	17
87	3	2,4	0,6	80	4,5	2,9	19
88	8	8	0	100	4	2,5	29
89	5	3	2	57	4,9	2,6	20
90	5	6	0		5,1	3	11
91	3	2,5	0,5	83	4,5	2,1	11
92	3,2	2,5	0,7	78	4,4	3,4	26
93	6	7	0		4,6	3,4	31
94	5	3,9	1,1	78	4,9	3,3	29
95	2,5	1,7	0,8	68	6,1	3,3	13
96	5	4,7	0,3	96	4,9	3,4	48
97	6,4	7	0		4,3	3,2	20
98	6	7	0		4,9	3,4	39
99	5	4,1	0,4	91	4,5	2,8	31
100	5	3,1	1,9	60	5,3	2,9	14
101	3,5	2,2	1,3	63	3,7	3,7	22
102	3	4	0		4,8	3,1	22
103	4,3	2,6	1,7	61	3,5	3,8	25
104	4,4	8	0		4	3,7	31
105	6	8	0		4,9	2	24
106	5,5	3,3	2,2	57	3,5	3,1	
107	7,2	8	0		4,4	3	41
108	7,8	6,4	1,4	82	5,2	2,4	25
109	3,6	4,5	0		4,7	2,4	22
110	4,1	3,3	0,8	81	8,4	0,5	19
111	3,2	2,8	0,4	88	4,5	3	21
112	2,6	1,5	1,1	58	4,3	3,6	24
113	3,3	1,5	1,8	46	5,2	2,6	32
114	3,2	3,1	0,1	97	4,1	3	13
115	5,5	5,3	0,2	96	5,2	3,2	29
116	4,3	1,3	3	30	3,2	3,1	15

(*) en pourcentage

N°	U total ppm	U soluble ppm	U insoluble ppm	$\frac{U \text{ soluble}}{U \text{ total}} (*)$	K ₂ O (*)	Na ₂ O (*)	α chocs / 15 mn.
117	3,9	3,7	0,2	95	4,3	3,6	11
118	4,4	4,2	0,2	95	5,4	3,5	9
119	3,3	2	1,3	61	4,2	4,2	7
120	4,2	3,2	1	76	4,6	3,6	23
121	2,8	2	0,8	72	5,9	3,2	13
122	4,6	3	1,6	65	6,1	2,3	21
123	2,4	1,7	0,7	71	4,2	3,9	10
124	3,5	3	0,5	86	4,5	3,1	18
125	7	8	0		3,8	3,9	20
126	4,2	3,4	0,8	81	3,9	3,1	24
127	15	14,5	0,5	97	4	3,5	34
128	16	16	0	100			41
129	3,5	3	0,5	86	4,9	3,3	11
130	2,7	2,1	0,6	78	4,7	3,6	11
131	6,8	5,5	1,3	81	4,2	3,5	17
132	7	5,2	1,8	74	6,2	3	24
133	3	2,3	0,7	58	4,9	3,1	12
134	6	4,2	1,8	70	4,6	2,7	15
135	2,2	1,9	0,3	86	4,4	3,5	15
136	10	7,7	2,3	77	4,5	3,3	33
137	4	3,5	0,5	87	4,2	3,3	18
138	4,5	3,8	0,7	85	3,9	2,7	20
139	3	2,4	0,6	80	4,2	3,3	17
140	13	13	0	100	4,3	3	41
141	13,5	10	3,5	74	5	1,7	17
142	13,5	13	0,5	96	4,6	3,8	47
143	8	10	0		4,6	2,9	14
144	3	2,9	0,1	97	5	3,7	14
145	7,3	4,6	2,7	63	4,2	3,4	26
146	6	6	0	100	3,9	3,2	15
147	6	5,4	0,6	90	4,4	3,5	19
148	5,3	4	1,3	76	4,8	3,3	20
149	4	3,6	0,4	90	4,8	3,5	33
150	10	9,5	0,5	95	4,2	3,5	23
151	2	1,5	0,5	75	5,3	2,8	17
152	3	2,3	0,7	77	5,3	3,1	18
153	5	6			4,8	3,4	
154	14	13	1	92	4,2	2,9	43
155	3,5	3,3	0,2	94	4,7	3,1	26
156	2,9	1,8	1,1	62	4,3	3	13
157	3,7	3,7	0	100	4,6	2,9	10
158	3,7	3,3	0,4	89	3,5	3,4	26
159	3,2	2,8	0,4	87	3,6	3,7	23
160	3,6	2,2	1,4	61	3,3	3,4	13
161	2,6	1,3	1,3	50	4,1	3,1	23
162	4,1	2,2	1,9	54	5	3,3	35
163	3,4	2,4	1	71	6,5	2,9	13
164	4	2	2	50	3,9	3,2	31
165	4,8	3,5	1,3	73	5,1	3,2	35
166	5,2	2,8	2,4	54	4,5	3,3	31
167	4	3,6	0,4	90	4	2,4	33
168	3,4	2,5	0,9	74	4,6	3,1	23
169	5,6	3,7	1,9	66	5,6	2,8	25
170	4,7	5			4,8	3,1	22
171	5,5	4,3	1,2	78	4,8	2,9	22
172	8	7,2	0,3	90	5	3,2	25
173	6,7	6,3	0,4	94	4,5	3,3	13

N°	U total ppm	U soluble ppm	U insoluble ppm	$\frac{U \text{ soluble}}{U \text{ total}} (*)$	K ₂ O (*)	Na ₂ O (*)	α chocs / 15 mn.
174	3,6	2,7	0,9	75	5,5	2,9	28
175	4,5	3,8	0,7	85	5,1	3,6	23
176	2,4	2	0,4	84	4,7	3,1	19
177	2,5	2,2	0,3	85	4,9	3,3	14
201	3,5	1,6	1,9	46	4,2	2,7	16
202	2,7	1,6	1,1	59	4,7	3,3	21
203	2,7	2	0,7	74	5,3	3	19
204	3,5	1,8	1,7	52	5,2	3	24
205	2,5	1,6	0,9	64	3,8	2,9	11
206	4,5	3	1,5	67	4,6	2,6	19
208	4,5	3,7	0,8	82	5,5	3	25
209	4,5	2,1	2,4	49	4,2	2,7	14
210	3,3	2,2	1,1	67	3,8	2,2	11
211	1,8	1,8	0	100	5	3,5	12
213	1,7	0,8	0,9	50	2,8	1,7	6
214	3,5	1,3	2,2	37	3,7	3,6	31
215	2,8	1,5	1,3	54	3,9	2,7	21
216	2	0,6	1,4	30	2,5	0,8	13
217	3,6	3,5	0,1	97	3,9	2,3	25
218	3	2,9	0,1	97	5,1	2,8	8
220	6,5	6,4	0,1	99	4,5	2,5	65
221	3	3	0	100	4,5	2,2	9
222	2,9	2	0,9	69	5,3	3,3	6
223	7	5	2	72	4,3	3,1	28
224	2,8	2,7	0,1	96	3,2	2,5	13
225	7,3	4,3	3	59	5	2,4	23
226	5	5	0	100	4,6	3,4	18
227	4	3,5	0,5	87	3,8	2,4	8
228	7	5	2	72	4,6	2,8	21
229	3	1,6	1,4	53	4,8	3,2	7
230	6,4	5	1,4	78	5,2	2,7	21
231	6	5,8	0,2	97	4,8	2,9	32
232	4,9	3,3	1,6	67	4,8	3,4	18
233	7,6	5,8	1,8	77	4,8	3,1	23
234	4	2,8	1,2	70	4	2,9	24
235	4,5	4,4	0,1	98	4,6	3,4	16
236	0,7	0,4	0,3	57			1
250	4,5	5,5	1	82	4,6	3,2	30
251	6,5	7	0	96	4,9	3,1	41
252	4,4	4	0,4	91	3,9	2,9	106
253	8,7	4	4,7	46	4,8	3	387
254	3,5	2,5	1	71	5,3	2,5	18
255	4,9	3,2	1,7	66	5,6	2,4	22
256	3,3	2,3	1	70	5	3,2	19
257	4	4	0	100	4,6	2,9	34
258	3,2	2,5	0,7	78	4,4	3,2	10
259	3,9	3,8	0,1	98	4,4	3,1	25
261	7,7	7,6	0,1	99	4,2	2,4	42
262	6	6	0	100	4,3	3,5	23
263	6	5,9	0,1	99	4,1	2,9	42
265	2	1,5	0,5	75	6,3	2,4	25
266	5	4	1	80	4,8	2,3	25
267	5	4,8	0,2	96	5	3,4	26
268	3	2,9	0,1	97	4,4	2,7	25
269	3,7	3	0,7	81	4,8	3	32
270	10	9	1	90	5,8	3	50
271	4	3,5	0,5	88	5,4	3	19
272	4,2	4	0,2	95	4,9	2,8	35
273	4	3	1	75	5,4	3,2	37

(*) en pourcentage.

III a - GRURY - Analyses classiques.

N°	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	H ₂ O ₋	H ₂ O ₊
195	72,01	14,9	0,90	1,70	0,03	0,56	0,7	3,05	5,68	0,15	0,09	0,17	0,1
196	71,94	15,00	0,84	0,50	0,02	2,1	0,30	3,18	4,50	0,15	0,18	0,8	0,17
194	71,65	11,4	3,4	2	0,3	1,96	0,7	3,02	4,68	0,4	0,32		
197	66,34	12,14	3,2	2,77	0,05	2,4	1,7	3,4	4,55	0,8	0,23	1,8	0,17
198	71,85	13,75	1,41	1,65	0,02	1,4	0,05	3,25	5,20	0,32	0,15	0,97	0,09
199	72,46	14,2	1,13	1,87	0,04	1,6	0,6	3,21	4,26	0,38	0,12	0,43	0,15
200	71,10	15,25	1,34	1,64	0,03	1,8	0,3	3,45	4,55	0,37	0,02	0,20	0,13
204	71,53	14,19	0,84	0,92	0,05	1,2	1,0	3,29	4,69	0,37	0,20	1,44	0,23
205	73,27	15,8	1,6	0,72	0,02	1,2	0,1	2,59	4,23	0,2	0,15	1,44	0,24
220	66,71	16,10	4,51	1,60	0,07	2,9	2,7	1,59	1,82	0,17	0,36	4,18	0,22

GRURY - Analyses rapides.

N°	FeO (*)	Fe ₂ O ₃ (*)	Na ₂ O (*)	K ₂ O (*)	CaO (*)	MgO (*)	Al ₂ O ₃ (*)
2	0,7		3,4	4,6	0,2	0,2	12,8
5	0,4		2,3	5	0,3	0,2	14,1
13	1,3	0,7	3,3	4,3	0,4	0,7	14,1
16	1,6	1,2	2,7	5,2	0,9	0,9	14,2
20	1,4	1,4	2,7	4,6	0,7	0,8	13,2
22	1,4	1,1	3,1	4,8	0,9	0,5	14,4
25	0,7	1,1	3,2	4,2	0,6	0,2	14,4
35	0,6	1,2	3,4	4,4	0,6	0,2	13,4
40	3,2	1,9	3	4,7	4,5	2,3	15,8
44	0,5	0,4	3,7	4,3	0,3	0,1	11,8
47	1,1	0,8	3,2	4,4	0,6	0,4	14,1
51	1,6	2,1	3,3	4	0,6	0,4	14,1
53	0,5	0,4	2,6	4,9	0,3	0,1	10
58	0,6	0,1	2,5	4,9	0,6	0,2	12,8
59	0,5	1,1	3	4,6	0,5	0,2	14,2
63	0,7	0,8	3	5	1	0,2	12,8
66	0,9	1	3	5	0,6	0,5	15,1
68	0,3	1,5	2,6	5,4	0,7	0,2	13,4
77	1,9	1,3	3,6	4,7	1	1,1	14,7
79	0,7	0,5	3,1	4,2	0,4	0,2	13,3
84	0,7	1	2,7	5,2	0,7	0,1	14,3
88	0,6	0,2	2,8	5,7	0,3	0,1	11,6
90	0,9	0,9	2,5	5,4	0,6	0,1	14,2
104	1,2	0,1	3,4	4,9	0,4	0,8	14,5
109	0,3	6,9	1,5	2,7	0,3	0,1	13,5
110	2	1,8	3,2	4,5	1,4	1,3	14,7
116	0,4	1,3	2,8	4,1	0,4	0,2	14
123	0,5	1,4	1	5	0,8	0,5	13,6
126	1,5	1,8	3	4,2	1,2	0,9	16
134	1,2	2,3	2,5	3,7	0,5	1	16
136	2	1,6	3,2	4,1	1,4	1,4	15,1
137	1	1,7	2,5	4,6	1,3	0,3	14
139	1,5	1,5	2,9	4,8	0,8	0,5	13
140	0,4	2	2,8	4,6	0,4	0,9	12,3
142	0,4	0,4	3,3	5,5	0,5	0,2	14,3
146	0,9	1	3	6,5	1,2	0,7	14,9
149	0,4	1,3	2,6	3,1	0,5	0,3	10,1
153	2	1,6	2,5	4,1	0,7	0,4	13,6
160	0,4	1,4	3,3	4,7	0,8	0,3	12,1
162	1,4	2,9	3,7	4	0,4	1,6	15,5
164	2,8	1,8	3,3	4,6	1,9	1,9	15,4

(*) en pourcentage.

Tableau III c.

GRURY

N°	U total ppm	U soluble ppm	U insoluble ppm	$\frac{\text{U soluble}}{\text{U total}} (*)$	K ₂ O (*)	Na ₂ O (*)	α chocs / 15 mn.
1	6	2,3	3,7	38	4,7	1,7	27
2	4	2,5	1,5	62	4,6	3,4	39
3	5	4	1	89	4,7	2,7	49
4	2,3	1,1	1,2	48	4,4	1,9	14
5	2	1,3	0,7	65	5	2,3	13
6	2	1	1	50	5,1	5	15
7	4	3,5	0,5	88	5,5	3,3	29
8	5,4	3	2,4	55			19
9	6,2	5,4	0,8	87	4,5	3,2	74
10	3,7	2,8	0,9	76	4,5	3,2	25
11	4	2,4	1,6	60	5,3	2	33
12	3	2,2	0,8	74	5,7	2,9	22
13	2	1,3	0,7	65	4,3	3,3	24
14	3,4	2,1	1,3	62	5,2	3,3	12
15	4,1	2,4	1,7	58	4,9	3,1	24
16	2,4	2	0,4	84	5,2	2,7	19
17	3,3	1,1	2,2	33	5,3	3	27
18	8,2	3,8	4,4	46	4	2,6	51
19	3,1	1,3	1,8	42	5,1	2,9	30
20	2,7	1,8	0,9	67	4,6	2,7	32
21	2,5	2	0,5	80	4,6	3,6	9
22	3,5	3,2	0,3	91	4,8	3,1	19
23	12	7,7	4,3	84	3,8	0,9	22
25	2,8	1,5	1,3	54	4,2	3,2	14
26	2	0,6	1,4	30	6,3	2,5	18
27	2	1,2	0,8	60	4,9	4	6
28	6,5	6,1	0,4	94	4,4	3,6	9
29	2,5	1,5	1,0	60	4,7	3,3	
30	2,3	2,1	0,2	91	3,6	3,5	9
31	3	3	0	100	4,3	2,6	10
32	5	2,3	2,7	46	4,2	2,1	27
33	17	16,5	0,5	97	3,8	1,8	33
34	5	4,5	0,5	90	4,2	3,5	20
35	2,5	1	1,5	40	4,4	3,4	5
36	3	2,6	0,4	87	4,4	3,2	15
37	1,7	1,4	0,3	82	4,4	3,2	7
38	1,3	0,7	0,6	54	4	3,7	5
39	2,3	1	1,3	43	7	1,7	39
40	5,5	3,3	2,2	60	4,7	3	44
41	9,4	8	1,4	85	4,2	3	45
42	5	4	1	80	3,6	2,7	18
43	8	6,9	1,1	86	4,9	3,1	43
44	3	2,2	0,8	73	4,3	3,7	18
45	3,8	3,3	0,5	87	4,4	3,2	11
46	5	3,8	1,2	76	4,9	3,2	30
47	5	4	1	80	4,4	3,2	20
48	7,5	6,7	0,8	89	4,7	3,1	59
49	3,5	2,9	0,6	83	4,5	3,9	16
50	4,5	2,3	1,2	51	5	3,3	21
51					4	3,3	
52	5,5	4,2	1,3	76	5,3	2,9	41
53	4,5	2,2	2,3	49	4,9	2,6	9
54	10	6,9	3,1	69	5	2,9	
55	2	1,8	0,2	90	6,2	1,7	0

(*) en pourcentage

N°	U total ppm	U soluble ppm	U insoluble ppm	$\frac{U \text{ soluble}}{U \text{ total}} (*)$	K ₂ O (*)	Na ₂ O (*)	α chocs / 15 mn.
55'	5,2	5	0,2	96	3,6	3,2	0
56	1,5	1,2	0,3	80	5,2	3,8	5
57	1,5	0,9	0,6	60	4	3,9	0
58	4	1,4	2,6	35	4,9	2,5	16
59	3	1,5	1,5	50	4,6	3	9
60	2,5	1,8	0,7	72	4,6	3,9	12
61	2,7	1,5	1,2	56	4,5	3,2	28
62	3,5	2,5	1,0	71	4	3,7	23
63	4,2	3,5	0,7	83	5	3	15
64	6,5	4,6	1,9	71	4,9	2,9	20
65	4,7	2,7	2,0	57	4,8	3,3	30
66	8,5	6,1	2,4	72	5	3	33
67	4	3,1	0,9	77	6,8	3	24
68	2,8	1,2	1,6	43	5,4	2,6	24
68	2,8	1,2	1,6	43			29
69	3,5	3,2	0,3	91	5	2,6	59
70	3	3	0	100	5,8	2,4	30
71	5	3,8	1,2	76	3,1	3,6	38
72	5	4,5	0,5	90	4,1	2,8	30
73	4	3,3	0,7	82	5,2	3	38
74	5,5	4,2	1,3	76	5,5	2,7	
75	4	3	1	75	4,6	3,2	27
77	4,5	3,5	1,0	78	4,7	3,6	28
78	3,5	2,2	1,3	63	4,5	0,8	18
79	7	5,5	1,5	79	4,2	3,1	8
80	1,5	0,5	1,0	33			2
81	9	7,8	1,2	87	4,8	2,8	48
82	3,5	2,6	0,9	75	4,4	3,2	65
83	6	4	2	67	5,4	3,1	34
84	7	3,5	3,5	50	5,2	2,7	44
85	2	1,1	0,9	55	6	2,4	17
86	2	1,1	0,9	55	5,6	2,2	20
87	11	9,8	2,2	89	5,2	2,8	66
88	6	3,1	2,9	52	5,7	2,8	43
89	3	1,3	1,7	43	6,2	1,4	39
90	5	2,5	2,5	50	5,4	2,5	42
91	4	2,8	1,2	70	5,1	2,9	15
91 bis	2	1,1	0,9	55			8
101	1,8	0,6	1,2	33	4,7	1,7	8
102	3,1	3	0,1	97	4,6	3,4	46
102 bis	2,3	2	0,3	87			51
103	2,3	2	0,3	87	4,5	5,2	26
103'	3	1,2	1,8	41	4,4	2,8	31
103''	2	1,4	0,6	70			
104	3,5	1,7	1,8	48	4,9	3,4	51
105	3,5	2,6	0,9	74	4,9	3,2	17
105 bis	3	2,6	0,9	86	5	3,2	31
106	3	0,8	1,2	27	6,1	3	44
107	2,4	1,2	1,2	50			7
108	5,9	3,7	2,2	63	4,8	2,7	20
109	1,5	0,6	0,9	40	2,7	1,5	9
110	3,4	3	0,4	88	4,5	3,2	42
111	5,5	3,4	2,1	62	4,1	2,9	38
112	3,5	1,3	2,2	37	0,3	3,3	40
113	3,7	1,5	2,2	40	4,1	2,3	39
114	6	3,1	2,9	52	4,2	2,6	56
115	5	2,4	2,6	48	4,9	2,6	40

(*) en pourcentage.

N°	U total ppm	U soluble ppm	U insoluble ppm	$\frac{\text{U soluble}}{\text{U total}}(*)$	K ₂ O (*)	Na ₂ O (*)	α chocs / 15 mn.
116	7	5,6	1,4	80	4,1	2,8	31
117	2,3	1	1,3	43	4	1,7	9
117 bis	3	1,5	1,5	50	4,5	2,4	15
118	4,5	1	3,5	22			
119	3,3	2,7	0,6	82	4,8	1,5	22
120	3,1	2	1,1	64	4,7	2,3	43
121	4	1,3	2,7	30	3,7	3,1	0
122	6	5,5	0,5	92	4,9	3,1	22
123	10	4,3	5,7	43	5	1	35
124	2,8	1,6	1,2	57	5,2	3,1	24
125	3,5	3,1	0,5	86	4,7	3	47
126	5,5	2,1	3,4	38	4,2	3	96
127	4,3	3,3	1,0	77	4,9	3,2	44
128	6,0	5,5	0,5	92	4,5	2,9	94
129	4,5	2,8	1,7	62	4,4	2,6	50
130	3	3	0	100	5,8	3,4	23
131	4,8	3,8	1,0	79	3,8	3,3	54
132	4	3,2	0,8	73	4,4	2,8	55
133	5,5	5,3	0,2	96	5,1	2,7	50
134	4,1	1,1	3	27	3,5	2,7	26
135	8,5	7,2	1,3	85	6,2	1,1	52
136	4,6	3,2	1,4	70	4,1	3,2	54
137	3,7	2,6	1,1	70	4,6	2,5	40
139	6,7	6,2	0,5	92	4,8	2,9	39
140	6,6	4,7	1,9	71	4,6	2,8	51
141	3,3	2,9	0,4	88	3,9	3,2	19
141 bis	3,3	2,9	0,4	88	4,1	3,4	22
142	3	1,4	1,6	47	5,5	3,2	7
142 bis	7,5	4	3,5	53	5,1	3	49
143	1,5	1,2	0,3	80	4,2	3,5	5
143 bis	2	1,9	0,1	95	5,1	4	7
144	1,3	0,9	0,4	70	4,6	3,5	2
145	3,3	2,9	0,4	88	3,6	3,6	3
146	2,7	2,6	0,1	96	6,5	3	33
147	4,5	2	2,5	45	4,9	3,1	24
148	2,1	1	1,1	48	4,1	3,8	18
149	4,6	3,4	1,2	74	3,1	2,6	34
150	3,3	2,7	0,6	82	5,3	3,2	41
151	6,3	4,6	1,7	73	4,9	2,9	70
152	2,1	2	0,1	95	4,9	2,7	16
153	3	1,6	1,4	54	4,1	2,5	53
154	3,3	0,6	2,7	18	4,4	3,4	37
154 bis	4	1,4	2,6	35	4,5	2,9	43
155	3,3	1,2	2,1	36			
156	3	1,6	1,4	53	4,9	3,6	17
157	5	4,5	0,5	90	3,7	2,7	50
157 bis	2,6	1,8	0,8	69	5,3	4,1	20
158	6,6	5	1,6	76	4,3	2,1	51
159	4,2	2,8	1,4	67	5	2,7	76
160	2,4	0,8	1,6	33	4,7	3,3	15
161	1,6	0,8	0,8	50	5	3,5	11
162	3,3	1,7	1,6	51	4	3,7	68
163	2,9	2,7	0,2	93	3,9	2,3	57
164	4	2,7	1,3	68	4,6	3,3	22
164 bis	4	2,4	1,6	60			41
165	2,8	2,2	0,6	79			17

(*) en pourcentage

IVa - ELBEMA - Analyses de roches.

	SiO ₂ (*)	FeO (*)	Fe ₂ O ₃ (*)	Na ₂ O (*)	K ₂ O (*)	CaO (*)	MgO (*)	Al ₂ O ₃ (*)
D 3	72	1,1	1,1	3,5	4,3	1,4	0,3	15,2
E 5	71,5	1,5	1,2	2,3	3,6	1,2	0,4	15,1
F 4	72	1,5	1,3	2,9	4,5	1,3	0,3	14,5
G 4	72,2	1,3	1,1	3,7	4,2	0,9	0,3	13,5
H 3	72,9	1,8	0,8	3,7	3,6	1,3	0,3	14,2
I 4	72,3	1,6	0,8	3,6	4,3	1,4	0,3	14
J 3	74,7	1,3	0,5	3,4	6,7	0,7	0,2	12
C 1	72,5	1,7	0,7	3,4	4,9	1	0,1	14,7
C 5	75	1,3	0,4	3,1	4,4	0,8	0,1	13,1
E 1	74,2	1,2	0,9	3,5	5,4	0,7	0,2	14

(*) en pourcentage.

Tableau IV b.

ELBEMA

N°	U total ppm	U soluble ppm	U insoluble ppm	U soluble U total (*)	K ₂ O (*)	Na ₂ O (*)	α chocs / 15 mn.
A 1	2	1	1	50	6,5	3,1	10
B 1	10	4,5	5,5	45	4,3	3,7	51
2	10	3,5	6,5	35	4,9	3,8	45
3	10	3,5	6,5	35	4,8	3,6	66
4	5	1,5	3,5	30	4,3	3,6	24
C 1	9	3,5	5,5	39	4,9	3,4	45
2	9	5,6	3,4	62	5,2	3,9	79
3	11	8,5	2,5	77	4,5	3,6	64
4	5	2,5	2,5	50	4,5	3,6	14
5	9	6,3	2,7	70	4,4	3,1	43
6	10	9	1	90	5,4	3,6	52
D 1	7	4,5	2,5	64	4,8	3,4	49
2	10	2,2	7,8	22	4,2	3,4	17
3	8	2	6	25	4,3	3,5	27
4	8	3,3	4,7	41	4,2	3,6	32
5	7	2,5	4,5	36	5,5	3,7	23
6	6	3,6	2,4	60	4,9	3,7	44
7	7	5,4	1,6	77	5,1	3,6	28
E 1	11	4	7	36	5,5	3,5	61
2	10	5	5	50	4,1	3,8	28
3	7	2,4	4,6	34	4,6	3,1	33
4	8	3,9	4,1	49	2,8	2,8	49
5	5	2,4	2,6	48	3,6	2,3	37
6	6	2,1	3,9	35	4,4	2,8	19
7	8	4,2	3,8	53	4,1	2,8	29
F 1	2	0,8	1,2	40	4,5	2,9	25
2	7	3,9	3,1	56	4,1	3,5	29
3	5	3,7	1,3	74	4,8	3,5	17
F 4	5	3	2	60	4,5	2,9	23
5	5	2,9	2,1	58	4,9	3,5	35
6	6	2,6	3,4	43	4,7	3,6	32
7	13	10	3	77	4,9	3,3	64
8	13	10	3	77	4,7	3,6	74
9	2	1,3	0,7	65	3,5	2,6	11
G 1	10	9	4	90	3,9	3,2	71
2	4	3,2	0,8	80	5	3,4	32
3	8	8	0	100	4,3	3,7	49
4	4	2	2	50	4	3,7	28
5	5	3	2	60	3,9	2,9	22
6	3	2,5	0,5	83	5	3,3	50
7	8	5,9	2,1	74	4,3	3,6	23
8	2	1,1	0,9	55	5,2	3,2	21
H 1	6	4,5	1,5	75	5,1	3,2	32
2	6	4	2	66	4,3	3,2	26
3	5	2,4	2,6	48	3,6	3,7	10
4	7	5,5	1,5	79	4	3,4	33
6 bis	8	4,5	3,5	56	4,3	3,8	56
6	5	4,4	0,6	88	4	3,8	25
I 1	5	4,5	0,5	90	4,5	3,7	25
2	1,8	0,4	1,4	22	3,6	3,5	18
3	6	4,3	1,7	71	4,8	3,7	24
4	9,5	7	2,5	74	4,3	3,6	37
5	7	2,6	4,4	37	4,4	3,7	31

(*) en pourcentage.

	U total ppm	U soluble ppm	U insoluble ppm	$\frac{U \text{ soluble}}{U \text{ total}} (*)$	K ₂ O (*)	Na ₂ O (*)	α chocs / 15 mn.
6	5, 8	4, 3	2, 5	74	3, 6	2, 7	25
J 1	5	3	2	60	3, 8	2, 8	29
2	9, 5	8	1, 5	84	4, 3	3, 8	43
3	10	7	3	70	6, 7	3, 4	47

(*) en pourcentage.

TABLE DES MATIÈRES

	Pages
Introduction	3
Remerciements	4
CHAPITRE I - Les méthodes	5
CHAPITRE II - Etudes régionales	17
CHAPITRE III - Les interprétations géochimiques	41
Conclusion	55
Bibliographie	57
Annexe 1	61
Annexe 2	63

DEUXIEME THESE

Propositions données par la Faculté

"LES METHODES GEOCHIMIQUES DANS LA RECHERCHE DES GISEMENTS"

Vu et approuvé :

Paris, le 24 Janvier 1959

Le Doyen de la Faculté des Sciences,
J. PERES

Vu

et Permis d'imprimer :
Le Recteur de l'Académie
de Paris,
Jean SARRAILH

IMP. LOUIS-JEAN — GAP

Dépôt légal n° 156 — 1959

